Massensterben und Impaktereignisse in der Erdgeschichte: Ein kurzer Überblick

Ch. KOEBERL

Abstract: Impacts of asteroids and comets represent the most energetic and spectacular geologic process currently known. The study of impact craters on Earth and on the Moon, as well as astronomical investigations of the orbits of asteroids and other solar system bodies, have allows the determination of the cratering rate for Earth (how many craters of which size form). The present publication gives a description of impact craters on the Earth and elsewhere in the solar system, the nature and origin of the impacting bodies (asteroids and comets), and a short summary on how impact craters can be recognized (mainly on the basis of shock metamorphic effects in rocks and minerals, and/or the search for remnants of the extraterrestrial body that are mixed in with the terrestrial target rocks). The physical effects of large-scale impact events are severe, ranging from burning due to the expanding fireball, seismic effects, possible tsunamis, and ejection and deposition of large amounts of rock and dust from the impact site. In very large events, these effects are global. An example of an impact event that had global implication is the formation of the about 200-km-diameter Chicxulub impact structure in Mexico, 65 million years ago, at the end of the Cretaceous. This event led to a severe mass extinction, in which more tan half of all of the then living species (fauna and flora) became extinct. Despite the well-documented link between the impact and the mass extinction in this case, there is – so far – no clear link between other mass extinctions (e.g., the end-Permian or end-Triassic extinctions) and impact events. Nevertheless, the importance of impact events of the geological and biological evolution of the Earth is undeniable.

Key words: Impacts, mass extinctions, craters, Cretaceous-Tertiary boundary.

Impaktereignisse im Sonnensystem und auf der Erde

Obwohl „Krater“ auf verschiedenen Himmelskörpern (vor allem auf dem Erdmond) seit der Erfindung des Fernrohres und den darauf folgenden Untersuchungen durch GALILEI (1610) und Nachfolger bekannt waren, gab es verschiedene Hypothesen zur Erklärung der Bildung dieser Strukturen. Die bis in das 20. Jahrhundert vorherschende Meinung war, dass praktisch alle Mondkrater durch Vulkanismus gebildet wurden. Weiters wurde bis vor nur wenigen Jahren die Untersuchung von Meteoritenkratern als ein Thema für die Astronomie, und nicht für die Erdwissenschaften, angesehen. Die Vorgänge, die die Gestalt unserer Erde bestimmten, wurden als langsame und endogene Prozesse gesehen, in der Tradition von James Hutton und Charles Lyell. Bekannte Impaktstrukturen, wie etwa das Nördlinger Ries in Süddeutschland, oder der Meteor Crater in Arizona, wurden als Ausnahmen betrachtet. Bis zur Mitte unseres Jahrhunderts noch waren viele Geologen – dem Beispiel von Lyell folgend – der Meinung, Einschlagskrater gäbe es auf der Erde nicht wirklich, denn die Entstehung eines solchen Kraters wurde ja von Menschen bisher noch beobachtet. In dieser Arbeit, die Überblicksarbeiten von KOEBERL (1998a, 2007) folgt, wird ein Überblick über die Entstehung, Erkennung, und geologische und biologische Bedeutung von Einschlagskratern gegeben, besonders im Hinblick auf die bekannten Massensterben in der Erdgeschichte.

Erst seit etwa 1980 hat die Diskussion von Meteoriteneinschlägen und deren geologischer Bedeutung auch Eingang in den „geologischen Alltag“ gefunden. Dies war vor allem die Folge von Untersuchungen der Gesteine an der Kreide-Tertiär-Grenze, wobei aus chemischen Anomalien auf ein gigantisches Einschlagsereignis vor 65 Millionen Jahren geschlossen wurde, das mit dem schon lange bekannten Aussterben der Dinosaurier und anderer Lebewesen in Verbindung gebracht wurde. Bei diesem Einschlagsereignis wurde der erst 1991 entdeckte – knapp 200 km durchmessende – Chicxulub-Krater in Mexiko gebildet, und die mit diesem Impaktereignis verbundenen Umweltkatastrophen markieren das Ende der Kreidezeit und führten zum Aussterben einer Vielzahl von Lebewesen auf der Erde (siehe unten).

Durch genaue geologische, geophysikalische, mineralogische, geochemische, und petrologische Untersu-

Denisia **20**,
zugleich Kataloge der
oberösterreichischen
Landesmuseen
Neue Serie **66** (2007):
97–114

chungen wurden mittlerweile über 170 Impaktkrater auf der Erde bestätigt (für den aktuellen Stand siehe Earth Impact Database, 2007). Während der letzten zwei oder drei Jahrzehnte ist die Planetologie außerdem zu der Erkenntnis gelangt, dass Einschlagsereignisse während der Entwicklung unseres Sonnensystems viel wichtiger waren, als früher angenommen. Impakte waren schon von Anbeginn an wichtig: die Planeten wurden durch Zusammenstöße kleiner Körper, der sogenannten Planetesimale, gebildet. Und die momentan am besten mit den Beobachtungen übereinstimmende Hypothese der Entstehung unseres Erdmondes besagt, dass vor etwa 4.45-4.50 Milliarden Jahren ein etwa Mars-großer Körper mit der Protoerde kollidierte, und aus den Überresten dieser Katastrophe entstand der Mond. Die Oberflächen aller Planeten, Satelliten, Kleinplaneten (etc.), die eine feste Oberfläche besitzen, sind von Einschlagskratern übersät. Das größte bekannte Einschlagsbecken im gesamten Sonnensystem ist auf dem Erdmond: das sogenannte Südpol-Aitken Basin umfaßt die gesamte Südpolgegend des Erdmondes, hat einen Durchmesser von knapp 2500 Kilometern und eine maximale Tiefe von 18 Kilometern. Impaktkrater gibt es im gesamten Sonnensystem. Mars hat zwar auch Rift-Systeme und Vulkane, aber seine Oberfläche ist doch von Impaktkratern dominiert. Auch der Merkur, der innerste Planet im Sonnensystem, ist mit Impaktkratern übersät. Und so setzt sich diese Beobachtung im ganzen Sonnensystem fort: Einschlagskrater sind meist die dominante Oberflächenformation.

Ein besonders schönes Beispiel bietet die Oberfläche unseres Erdmondes, die vollkommen von Kratern bedeckt ist. Durch die Untersuchung der Häufigkeit und Verteilung von Einschlagskratern auf dem Erdmond kann man die Impakthäufigkeit im inneren Sonnensystem (also in Erdnähe) bestimmen. Der Mond hat keine Atmosphäre und ist auch nicht (mehr) geologisch aktiv, so dass seine Oberfläche alle Einschlagsereignisse, die über mehrere Milliarden Jahre erfolgt sind, aufgezeichnet hat. Auf Grund ihrer größeren Anziehungskraft wurde die Erde im Laufe der Jahrmilliarden von einer noch größeren Zahl an kosmischen Projektilen getroffen als der Mond. Die Oberfläche der Erde sollte also mit Einschlagskratern bedeckt sein (vor allem im Vergleich mit der Mondoberfläche). Die Erklärung, warum man auf der Erdoberfläche eher selten Einschlagskrater sieht, hängt mit aktiven geologischen Vorgängen, wie etwa Erosion, Subduktion, Sedimentation, Vulkanismus, etc., zusammen. Dadurch werden Einschlagskrater auf der Erdoberfläche entweder abgetragen und zerstört, oder durch spätere Gesteinsbildungen verdeckt.

Aus astronomischen Untersuchungen, sowie aus geochronologischen Untersuchungen der bekannten Meteoritenkrater, kann die Frequenz der Einschläge von kosmischen Körpern untersucht werden (siehe dazu auch unten, und CHAPMAN & MORRISON 1994). Daraus findet man etwa, dass Körper mit etwa 1 km Durchmesser, die Krater von etwa 20-40 km Durchmesser schlagen (wie zum Beispiel das Nördlinger Ries), etwa einmal pro Million Jahre auf der Erde auftreffen. Kleine Einschläge (Krater mit etwa 1 km Durchmesser, wie z. B. der Meteor Crater in Arizona) sind wesentlich häufiger – einmal pro etwa 10,000 Jahre. Wirklich große Einschläge, die zur Bildung von Kratern im Bereich von mehr als 100 km Durchmesser führen, sind seltener und treten wahrscheinlich etwa einmal in 50-100 Millionen Jahren auf. Solche gigantischen Einschlagsereignisse sind es dann auch, die zu globalen Katastrophen – und möglicherweise zu Massensterben – führen können.

Wie erkennt man Einschlagskrater?

Zur detaillierten Erklärung der Erscheinungsformen von Einschlagskratern und ihrer Charakteristika muss auf die Fachliteratur verwiesen werden (z. B. MELOSH 1989; FRENCH 1998; KOEBERL 1998b, 2002). Hier soll nur eine kurze Zusammenfassung zu diesem Thema gegeben werden. Morphologisch gesehen unterscheidet man auf Grund der unterschiedlichen Durchmesser und Strukturen zwei grundsätzlich unterschiedliche Formen von Einschlagskratern: die einfachen und die komplexen Krater (z. B. MELOSH 1989). Auf der Erde sind alle Krater, die kleiner als etwa 2 km im Durchmesser sind, einfache, schüsselförmige Krater; alle anderen Krater sind komplexe Krater, die einen Zentralberg oder ein zentrales Ringsystem aufweisen. Diese beiden wesentlichen Kraterarten sind auch in der Abb. 1 im Querschnitt gezeigt. In Abb. 2 sind dann einige Beispiele relativ junger schüsselförmiger Krater auf der Erdoberfläche zu sehen, z. B. der Meteor Crater in Arizona, der Tswaing Krater in Südafrika, oder Lonar in Indien. Diese Strukturen werden als „einfache Krater" bezeichnet. Abb. 2 zeigt auch komplizierter aufgebaute Krater mit einem Zentralberg, beziehungsweise einer Gruppe von Bergen oder Hügeln, die das Ergebnis von Kollaps und späterer partieller Erosion eines Zentralbergs sind. Diese Strukturen werden als „komplexe Krater" bezeichnet.

Einfache Krater haben eine etwas andere Morphologie als komplexe Krater – sie sind wesentlich tiefer im Verhältnis zu ihrem Durchmesser als komplexe Krater. In beiden Fällen ist der Kraterboden mit Brekzien und Impaktschmelzen bedeckt; dieses Material ist bei der Kraterbildung wieder in den Krater zurückgefallen. Unter der „Brekzienlinse" befindet sich dann durch den Einschlag zerrüttetes und zerbrochenes Gestein, das allerdings seinen ursprünglichen Ort nicht verlassen hat. Ein weiterer Teil des ausgeworfenen Materials (Ejekta) ist um den Krater verteilt – je näher am Kraterrand, desto dicker ist diese Auswurfdecke. Im Zentrum von

komplexen Kratern findet man meist einen Zentralberg oder eine Ringstruktur aus Hügeln. Diese zentralen Strukturen sind aus Gesteinen aufgebaut, die nicht von oberflächennahen, sondern von tieferen Gesteinsformationen stammen. Darin hat man ein gutes Unterscheidungsmerkmal zwischen Vulkan- und Einschlagskratern: bei komplexen Impaktkratern findet man im Zentrum Gesteine, die aus größerer Tiefe stammen. Komplexe Krater besitzen deutlich mehr Schmelzgestein (bis zu etwa 5 % des gesamten Kratervolumens), das in Form von großen Schmelzkörpern, Linsen, Schichten oder Gängen auftreten kann. Bei sehr stark durch Erosion zerstörten Kratern ist der Zentralberg oft der einzige Teil des Kraters, der noch übrig ist, wenn der Rest schon bis auf den unteren Teil des mit Brekzien gefüllten Kratergrabens abgetragen ist.

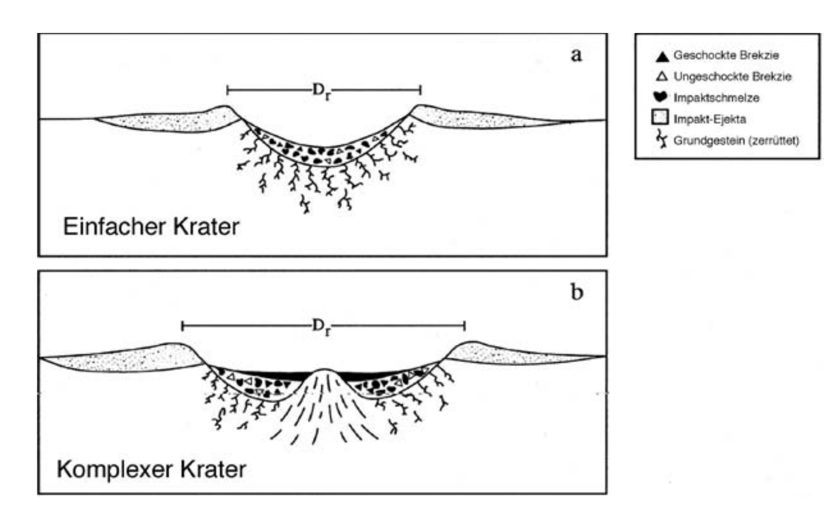


Abb. 1: Schematischer Querschnitt durch einfache und komplexe Einschlagskrater.

(A) (B) (C) (D) (E) (F) (G) (H) (I)

Abb. 2: Beispiele von einfachen und komplexen Impaktkratern auf der Erde. Die Krater in der oberen Reihe, und jener in der Mitte rechts, sind einfache Krater, die anderen sind komplexe Krater. Jeweils von links nach rechts; Oben: (**A**) Tswaing (Saltpan)-Krater in Südafrika (1.2 km Durchmesser, 250,000 Jahre alt); (**B**) Wolfe Creek Krater in Australien (1 km Durchmesser, 1 Million Jahre alt); (**C**) Meteor Krater in Arizona, USA (1.2 km Durchmesser, 50,000 Jahre alt); Mitte: (**D**) Lonar Krater, Indien (1.8 km Durchmesser, Alter ca. 50,000 Jahre), (**E**) Mistastin Krater in Kanada (28 km Durchmesser, Alter ca. 38 Millionen Jahre), (**F**) Roter Kamm Krater in Namibien (2.5 km Durchmesser, Alter ca. 4 Millionen Jahre); Unten: (**G**) Clearwater-Doppelkrater in Kanada (24 und 32 km Durchmesser, Alter ca. 250 Millionen Jahre); (**H**) Gosses Bluff Krater in Australien (24 km Durchmesser, Alter 143 Millionen Jahre), und (**I**) Aorounga Krater im Tschad (18 km Durchmesser, Alter unbekannt aber jünger als ca. 300 Millionen Jahre).



Abb. 3: Typischer Suevit vom Bosumtwi-Krater in Ghana (Westafrika). Das Stück ist etwa 25 cm breit. Suevit ist eine glasführende polymikte Brekzie, dominiert von Kristallingesteinen, die einer sehr hohen Temperatur ausgesetzt war (daher die Schmelzeinschlüsse). In dem Bild sind Schmelzeinschlüsse (Glas) markiert; es handelt sich um die helleren blasenreichen Einschlüsse.

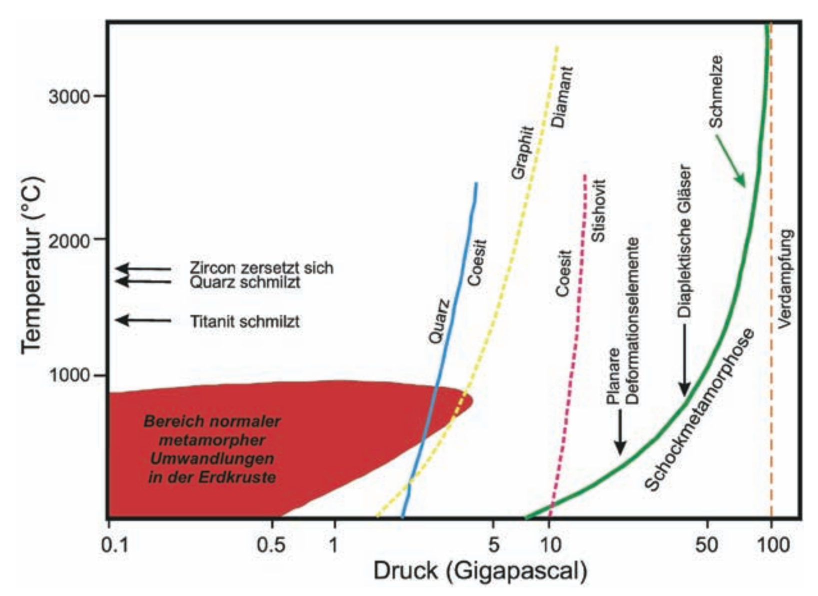


Abb. 4: Druck und Temperaturdiagramm für Gesteine, die einem Einschlagsereignis ausgesetzt sind. Der Druck, der bei so einem Ereignis in Form einer Schockwelle in den Boden läuft und zu irreversiblen Änderungen in der Kristallstruktur der Gesteine, sowie zum Aufschmelzen und Verdampfen der Gesteine führt, ist um mehrere Größenordnungen höher als der höchste Druck, der bei endogenen Prozessen (z. B. Vulkaneruptionen) entstehen kann.

Für Geologen stellt sich die Frage, wie man man nachweisen kann, ob eine bestimmte geologische Struktur durch einen Einschlag entstanden ist. Luftbilder und Satellitenaufnahmen sind zur Enddiagnose ungeeignet (KOEBERL 2004). Geophysikalische Beobachtungen können wertvolle Hinweise liefern (z. B. PILKINGTON & GRIEVE 1992), aber die Bestätigung erfolgt durch petrographische und mineralogische, sowie geochemische Untersuchungen an Gesteinsproben der jeweiligen Struktur. Die geochemische Untersuchung von Impaktprodukten – wie zum Beispiel Impaktgläser, Impaktschmelze und andere Impakt-Brekzien – kann Hinweise auf die Entstehungsgeschichte sowie auf das Alter der jeweiligen Meteoritenkrater geben. Anreicherungen an Elementen, die in Meteoriten häufig vorkommen (wie zum Beispiel die Platinmetalle), können gute Hinweise auf die Impaktentstehung einer Struktur geben (siehe KOEBERL 1998b 2002). Besonders wichtig für die Bestimmung der Impaktnatur eines Kraters sind Impaktbrekzien (siehe FRENCH 1998). Durch die hohe Impaktenergie beim Einschlag wird eine Schockwelle gebildet, die durch das Gestein läuft und zu unumkehrbaren Änderungen der Kristallstruktur der gesteinsbildenden Minerale führt. Die Schockwellen laufen sowohl in das Target, als auch in das Projektil, hinein. Die enorm hohen Drucke, die mit den Schockwellen verbunden sind, übersteigen bei weitem die Materialstärke der Gesteine, die bei der Entlastung nach der Kompression schlagartig aufschmelzen oder verdampfen. Die dabei auftretenen Drucke sind im Bereich von Megabar (Millionen Bar, also millionenmal höhere Drucke als der Luftdruck auf der Erdoberfläche).

Bei diesen Prozessen werden die Gesteine sowohl lokal and also im weiteren Umfeld zerrüttet – es entsteht eine sogenannte Brekzie. Im konkreten Fall spricht man von Impakt-Brekzien, wobei hier verschiedene Typen unterschieden werden. Oft werden Gesteine zerbrochen und während Kraterbildung viele Kilometer am Boden oder durch die Luft bewegt, wobei dann verschiedene Gesteinstypen zusammengemischt und zementiert werden; das Resultat nennt man eine polymikte Brekzie. Wenn eine solche Brekzie Überreste von geschmolzenem Gestein enthält (da der Druck und die Temperatur so hoch waren, dass Targetgestein aufgeschmolzen wurde), nennt man ein solches Gestein einen „Suevit" (nach dem lateinischen Namen für die Region Schwaben in Süddeutschland, wo die Typenformation für diese Brekzienart im Nördlinger Ries auftritt). Ein Beispiel eines Suevites – mit Glaseinschlüssen – ist in Abb. 3 gezeigt. Die Temperatur, der einige Komponenten dieses Gesteins ausgesetzt waren, betrug bis zu 2000 °C.

Bei Einschlagsereignissen kommt es also innerhalb kürzester Zeiträume zu sehr hohen Drucken und Temperaturen, die um Größenordnungen höher sind als jene, die bei normalen endogenen (internen) geologischen Prozessen, wie zum Beispiel Metamorphose, Gebirgsbildung, oder Vulkanausbrüchen, auftreten – siehe Abb. 4. Dabei kommt es zu unumkehrbaren Veränderungen in den Gesteinen und Mineralen des Gesteins, in das der Impakt erfolgt. Insbesondere die Kristallstruktur der Minerale wird durch die hohen Drücke gestört. Es kann auch zur Bildung von Hochdruckphasen einiger Minerale (z. B. Coesit aus Quartz, oder Stishovit aus Coesit,

oder Diamant aus Graphit) kommen. Kristallographische Veränderungen, die typisch für die Schock-Metamorphose (auch „Stoßwellenmetamorphose" genannt) sind, werden als „planare Deformationsstrukturen" (PDF) bezeichnet (siehe STÖFFLER & LANGENHORST 1994; FRENCH 1998). Diese sind auf Änderungen im Kristallgitter von Mineralen (zum Beispiel Quarz oder Feldspat) zurückzuführen, die nur mit dem Mikroskop gesehen werden können. Dabei handelt es sich um regelmäßige, parallele und generell zueinander im gleichen Abstand stehende, extrem gerade (planare) Lamellen, die einen Quarzkristall durchziehen (daher auch der oft informell verwendete Begriff „Schocklamellen"). Diese Lamellen sind sehr dünn (ca. 1 µm), parallel und regelmäßig, und treten in Form von einem oder mehreren einander schneidenden Systemen mit genau definierten kristallographischen Orientierungen auf. Ein Beispiel für eine Mikroskopaufnahme eines geschockten Quarzkristalls ist in Abb. 5 gezeigt. Die Form und Art der planaren Deformationsstrukturen ist charakteristisch und kommt in dieser Art in der Natur ausschließlich in Gesteinen von Einschlagskratern vor. Das Vorhandensein solcher Schockstrukturen ist daher ein eindeutiger Beweis für die Impaktentstehung eines Kraters. Außerdem ist es möglich, außer den petrographischen Kriterien zur Krateridentifikation auch geochemische Charakteristika, nämlich die Anreicherung typisch extraterrestrischer Elemente in Impakt-Brekzien, vor allem in Impaktschmelzgestein, heranzuziehen (KOEBERL 1998b; siehe auch unten – Kreide-Tertiär-Grenze).

Die Bestätigung einer geologisch interessanten und auffälligen Struktur als Impaktkrater bedarf also relativ langwieriger und oft auch technisch aufwendiger geologischer, geophysikalischer, petrographischer und geochemischer Untersuchungen. Im Zeitalter der einfach zu beschaffenden Satellitenbilder wird oft und unkritisch eine annähernd kreisähnliche Struktur unbekannter (oder nicht nachgeprüfter) geologischer Natur als Impaktkrater bezeichnet. Einfache, sogar wellige Linien in Quarzkristallen werden als Schocklamellen bezeichnet, und chemische Anomalien – aus dem Zusammenhang gerissen – werden als Beweis für eine Impaktnatur zitiert. Leider häufen sich solche oberflächlichen Untersuchungen in der jüngeren Vergangenheit.

Häufigkeit der Einschlagsereignisse auf der Erde

Die Häufigkeit, mit der Krater auf der Erde gebildet werden, ist von großer Bedeutung für die Gefahren- und Auswirkungsabschätzung (siehe auch GEHRELS 1994, und ATKINSON et al. 2000). Als einschlagende Körper kommen im inneren Sonnensystem zwei verschiedene Quellen in Frage: die Asteroiden (Kleinplaneten) und

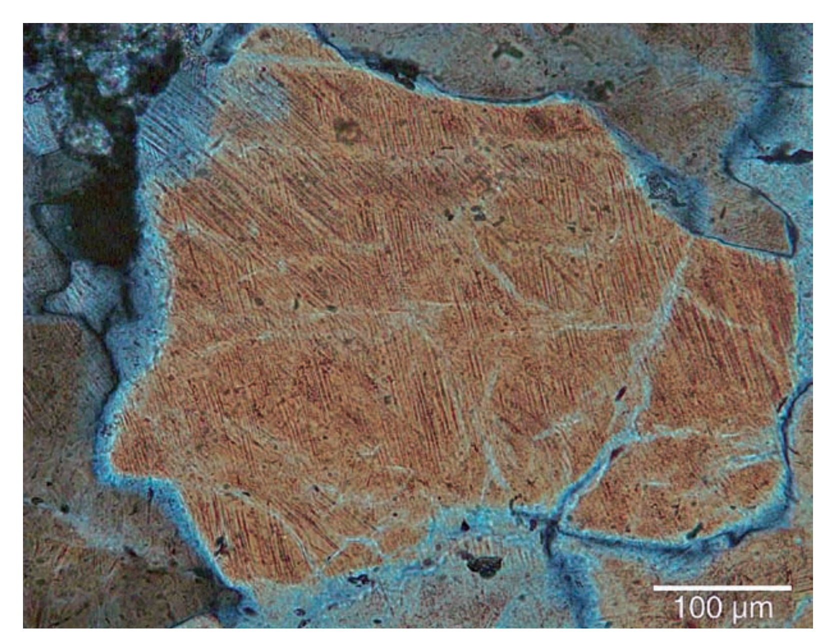


Abb. 5: Geschockter Quarzkristall im optischen Mikroskop. Besonders deutlich sind die sogenannten planaren Deformationselemente („Schocklamellen") zu sehen, die planar (gerade) sind, den ganzen Kristall durchsetzen, parallel zueinander sind, und in mehr als einer Orientierung (mehr als ein „Set") vorkommen. Das Bild zeigt einen Quarzkristall aus den suevitischen Brekzien in Kern LB-08A im Zentrum des Bosumtwi-Kraters in Ghana (Photo: L. Ferriere, Univ. Wien).

die Kometen. Kleinplaneten ziehen hauptsächlich zwischen Mars und Jupiter um die Sonne. Es handelt sich um Steinbrocken von bis zu 1000 km Durchmesser, von denen einige auch einen metallischen Kern besitzen (der bei Zusammenstößen freigesetzt werden kann). Heute kennt man von etwa 15,000 Kleinplaneten relativ genaue Bahnen. Mit der Erde und anderen Körpern im inneren Sonnsystem kollidieren können allerdings nur Kleinplaneten, die sich nicht auf „normalen" Bahnen im Asteroidengürtel bewegen, sondern lediglich jene, die sich auf exzentrischen Bahnen befinden, die sie in Erdnähe bringen oder die sogar die Erdbahn kreuzen. Diese Objekte werden im Englischen als „Near-Earth Objects", erdnahe Objekte, bezeichnet. Die Abkürzung NEOs ist mittlerweile auch international gebräuchlich. Die Bahnen der Kleinplaneten sind nicht für längere Zeit stabil. Auf Grund der Wechselwirkung mit der Anziehungskraft der Planeten ändern sich die Bahnelemente relativ rasch.

Dies bedeutet, dass die Verweilzeit der Asteroiden in den erdbahnkreuzenden Bahnen relativ kurz ist. Einige wenige Millionen Jahre sind zwar für Menschen eine lange Zeit, aber im Rahmen geologischer und astronomischer Zeitskalen sehr kurz, verglichen mit dem Alter des Planetensystems. Die NEOs müssen daher ständig nachgeliefert werden. Eine gute Quelle stellt der Asteroidengürtel zwischen Mars und Jupiter dar. Durch ständige Störungen der Bahnen untereinander und durch die großen Planeten, sowie durch Zusammenstöße un-

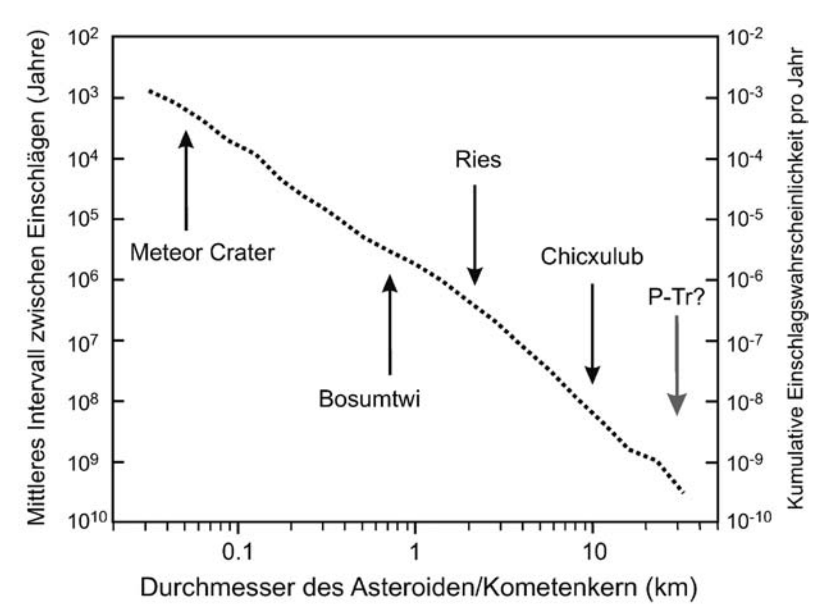


Abb. 6: Zusammenhang zwischen Einschlagshäufigkeit und Durchmesser des einschlagenden Körpers (dargestellt für die mittlere Dichte von Steinmeteoriten/Asteroiden bzw. Kometenkerne). Die Einschlagshäufigkeit ist in Form des mittleren Intervals in Jahren zwischen den einzelnen Ereignissen, sowie als kumulative Wahrscheinlichkeit pro Jahr, gegeben. Diagramm teilweise nach STUART & BINZEL (2004). Die Größe des kleinsten postulierten hypothetischen Körpers für einen Einschlag an der Perm-Trias-Grenze ist eingezeichnet.

tereinander, werden immer wieder Kleinplaneten aus dem Asteroidengürtel in Bahnen gebracht, die sie ins innere Sonnensystem führen. Die momentan größten bekannten NEOs haben einen Durchmesser von knapp über 8 km. Der Einschlag eines solchen Körpers auf der Erde kann, je nach Geschwindigkeit, einen Krater von etwa 100 bis knapp über 200 km Durchmesser bilden. Obwohl heute mehrere tausend NEOs bekannt sind (vor allem auf Grund der automatisierten astronomischen Suchprogramme in den USA), ist das nur ein Bruchteil der Körper, die tatsächlich in die Nähe der Erde kommen können. Aus den bisher vorhandenen Beobachtungsdaten sowie aus theoretischen Überlegungen weiß man, dass es eine Korrelation zwischen der Größe und der Häufigkeit der NEOs gibt: je kleiner, desto häufiger (z. B. STUART & BINZEL 2004).

Die zweite große Gruppe der möglichen „Impaktoren" auf der Erde sind die Kometen, die nicht auf so regelmäßigen Bahnen im inneren Sonnensystem wie die Kleinplaneten laufen. Kurzperiodische Kometen laufen auf wenig exzentrischen Ellipsenbahnen, die sie mit Umlaufperioden von weniger als 200 Jahren immer wieder in Sonnennähe bringen (z. B. Komet Halley, der zuletzt 1986 der Erde nahe kam). Im Gegensatz dazu bewegen sich langperiodische Kometen auf sehr exzentrischen Ellipsen oder sogar Parabelbahnen und haben Umlaufperioden von mehreren hundert bis zu Millionen Jahren. Interessante Sonderfälle sind Kometenkerne, die in mehrere Teile brachen – etwa Komet Shoemaker-Levy 9, von dem im Jahr 1994 etwa 20 Bruchstücke auf den Planeten Jupiter stürzten und „Impaktwolken" mit Durchmessern ähnlich jener der Erde bildeten (SPENCER & MITTON 1995).

Es gibt also zwei wichtige Klassen von „Impaktoren", die der Erde gefährlich werden können, die Kleinplaneten (NEOs) und die Kometen, wobei letztere laut verschiedener Berechnungen für einen geringeren Prozentsatz der Einschläge verantwortlich sind. Wie oft kommt es aber im Durchschnitt zu derartigen Einschlagsereignissen auf der Erde? Natürlich ist zu erwarten, dass kleinere Körper – weil es viel mehr von ihnen gibt – wesentlich häufiger mit der Erde zusammenstoßen können, als größere Körper. Abb. 6 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Durchmesser des einschlagenden Objektes und der Häufigkeit mit der ein solcher Körper mit der Erde kollidiert, gezeichnet als das mittlere Intervall zwischen Einschlägen. Zusätzlich ist noch die addierte (kumulative) Einschlagswahrscheinlichkeit pro Jahr angegeben. Aus diesem Diagramm erkennt man, dass zum Beispiel Einschläge von Körpern mit ca. 50-100 m Durchmesser, die Krater mit einigen hundert Metern bis ca. 1.5 km Durchmesser schlagen können, alle paar tausend Jahre einmal auf der Erde vorkommen. Vor allem bei kleineren Kratern ist die Art des Impaktors – ob ein Stein- oder Eisen"meteorit" – wichtig. Krater von der Größe des Rieskraters in Süddeutschland (24 km Durchmesser) werden nur etwa alle Million Jahre gebildet, und Ereignisse von Chicxulub-Größe, die Massensterben auslösen können, nur etwa einmal pro 100 Millionen Jahre.

Tab. 1 führt alle heute (2007) bekannten irdischen Impaktkrater an, die größer als 30 km sind. Sowohl Lokalitäten als auch Alter sind angegeben. Dabei fällt auf, dass zwar kleine Krater meist durch Erosion zerstört werden, aber die Situation bei größeren Strukturen anders ist. Die meisten großen Impaktstrukturen auf der Erde sind auch relativ alt – die beiden ältesten bekannten Krater sind auch gleichzeitig die größten bekannten Strukturen – Vredefort und Sudbury (obwohl deren heutige Durchmesser und Oberflächenaufschlüsse wesentlich kleiner sind als ihre rekonstruierten Durchmesser). Von manchen Kratern sind keine oder fast keine Spuren auf der Erdoberfläche vorhanden (z. B. Chicxulub), trotz ihres nicht allzuhohen Alters. Die Entdeckungsgeschichte der letzten Jahre zeigt, dass es offensichtlich noch eine beträchtliche Zahl an großen Impaktkratern auf der Erde gibt – nur viele von ihnen sind durch Sedimentgesteine verdeckt und daher unseren Blicken verborgen. Diese Einschläge waren es aber, die große Umweltveränderungen hervorgerufen haben.

Der Impaktprozess und seine Folgen

Um die Auswirkungen, vor allem bezüglich der Umwelteinflüsse von Einschlagsereignissen, diskutieren zu können, ist es zuerst notwendig, kurz zu beschreiben, was bei einem solchen Einschlag vor sich geht. Aus Platzgründen ist diese Beschreibung kurz gehalten. Interessierte Leser werden für Details auf die Bücher von MELOSH (1989) und KOEBERL (1998a), sowie die Arbeiten von TOON et al. (1997), KRING (1997) und COLLINS et al. (2005) (und Zitate in diesen Publikationen), verwiesen. Der Begriff „Impakt" charakterisiert einen kontinuierlichen Vorgang, der mit der Berührung der Oberfläche durch den „Boliden" oder das „Projektil" beginnt und mit den letzten Setzungsbewegungen der Gesteine im fertigen Krater endet. Zum besseren Verständnis der Vorgänge unterteilt man jedoch diesen kontinuerlichen Prozess in drei Phasen, die Kontakt- und Kompressionsphase, die Auswurfphase, und die Modifikationsphase (siehe MELOSH 1989). Nachdem der Kleinplanet oder Komet die Erdoberfläche trifft (mit Geschwindigkeiten, die aus himmelsmechanischen Gründen zwischen 11 und 72 km/s liegen), beginnt die Kontakt- und Kompressionsphase. Das sich rasch bewegende „Projektil" dringt vorerst in die (Erd)Oberfläche ein, beginnt diese zu komprimieren, und beschleunigt einen Teil dieses Materials bis auf einen signifikanten Teil der Einschlagsgeschwindigkeit. Danach bremst der Widerstand des getroffenen Gesteins (oder Wasser im Fall des Ozeans) das Projektil rasch ab und es bilden sich Schockwellen, die vom Berührungspunkt zwischen Projektil und Target ausgehen. Die Schockwellen laufen sowohl in das Target, als auch in das Projektil, hinein. Die enorm hohen Drucke, die mit den Schockwellen verbunden sind, übersteigen bei weitem die Materialstärke der Gesteine, die bei der Entlastung nach der Kompression schlagartig aufschmelzen oder verdampfen. Die dabei auftretenden Drucke liegen, wie erwähnt, im Bereich von einigen Megabar. Dabei wird das Projektil (und ein viel größeres Volumen an Targetgestein) aufgeschmolzen und teilweise verdampft.

In der sofort darauf folgenden Phase, der Auswurfphase, dringt die mehr oder weniger kugelschalenförmige Schockwelle weiter in den Boden ein. Je weiter sich diese Schockwelle vom Impaktpunkt entfernt, desto geringer wird ihre Energie und der damit verbundene Druck. Die höchsten Drucke sind daher in unmittelbarer Nähe des Einschlagspunktes zu erwarten. Das Material, das sich unter hohen Temperatur- und Druckbedingungen befindet, dehnt sich explosionsartig aus – hier ist die Analogie mit Bombenexplosionen zu sehen. Über dem Einschlagspunkt befindet sich auch ein sich rasch ausdehnender glutheisser Feuerball, der aus verdampftem Projektil- und Targetmaterial besteht und der die Atmosphäre verdrängt. Hinter der Schockwelle (Kompression) folgt eine Entlastung, die man als Unterdruckwelle verstehen könnte. Dadurch wird zertrümmertes, geschmolzenes, oder verdampftes Material in Bewegung gesetzt, was zur eigentlichen Kraterbildung führt.

Tab. 1: Liste aller im Jahre 2006 bekannten Impaktstrukturen auf der Erde, deren Durchmesser größer als 30 km ist. Nach POAG et al. (2004) und Earth Impact Database (2007), mit Zusatzinformationen.

Name	Land	Breite	Länge	Durchmesser (km)	Alter (Myr)
Vredefort	South Africa	-27.00	27.50	300	2023
Sudbury	Canada	46.60	-81.18	240	1850
Chicxulub	Mexiko	21.33	-89.50	180	65
Manicouagan	Canada	51.38	-68.70	100	214
Popigai	Russia	71.50	111.00	100	35
Acraman	Australia	-32.02	135.45	90	580
Chesapeake Bay	USA	37.25	-76.00	85	35.3
Puchezh-Katunki	Russia	57.10	43.58	80	220
Morokweng	South Africa	-26.47	23.53	70	145
Kara	Russia	69.08	64.30	65	73
Beaverhead	USA	44.60	-113.00	60	600
Siljan	Sweden	61.03	14.87	60	377
Tookoonooka	Australia	-27.00	143.00	55	128
Charlevoix	Canada	47.53	-70.30	54	357
Montagnais	Canada	42.88	-64.22	45	51
Araguainha Dome	Brazil	-16.77	-52.98	40	249
Mjølnir	Norway	73.80	29.66	40	143
Saint Martin	Canada	51.78	-98.53	40	220
Carswell	Canada	58.45	-109.50	39	115
Manson	USA	42.58	-94.52	38	74
Clearwater Lake West	Canada	56.22	-74.50	36	290
Kara-Kul	Tajikistan	39.02	73.45	30	<50
Slate Islands	Canada	48.67	-87.00	30	436
Teague	Australia	-25.87	120.88	30	1685

Ausgeworfenes Material wird als Ejekta bezeichnet (siehe MONTANARI & KOEBERL 2000). Ein Teil wird mit dem sich nach wie vor ausbreitenden Feuerball mitgenommen. Dieses Material kann sehr weit von der Einschlagsstelle entfernt wieder fallen. Manche distale Ejekta bestehen aus Glas und werden als Tektite bezeichnet (z. B. KOEBERL 1986). Bei sehr großen Einschlägen, die zu Kratern von etwa 100 Kilometern Durchmesser führen, kann ein Teil des ausgeworfenen Materials sogar in die Stratosphäre und in eine Erdumlaufbahn gelangen, um dann über lange Zeit (sogar über einen Zeitraum von mehreren Jahren hinweg) wieder auf die Erde zu fallen (siehe nächstes Kapitel). In geringerem Ausmaß kennt man diesen Effekt auch von Vulkaneruptionen, wo Asche in die Stratosphäre gelangt. Im Krater selbst fließt das Material aus der Tiefe des sich öffnenden Kraters am immer weiter zurückweichenden Kraterrand vorbei und bildet eine Art Vorhang – wie ein umgekehrter Kegel – aus Auswurfmaterial. Dieser



Abb. 7: Der Wiener Stephansdom als Größenvergleich im „Meteor Crater" in Arizona (Durchmesser 1.2 km); Blick vom Norden (Kratermuseum im Vordergrund am Kraterrand). Die Größe des einschlagenden Objektes, der einen Krater dieser Dimension bildet, hat einen Durchmesser von etwa einem Drittel der Höhe des Stephansdoms.

Vorhang bewegt sich vom Krater weg, wobei Material ausregnet. Dieses Material besteht aus zerbrochenem, geschocktem, oder aufgeschmolzenem Gestein.

Der frisch gebildete Krater ist nicht stabil, und der Kraterrand, der teilweise aus geschockten, zerrütteten, und aufgeschobenen Gesteinen besteht, beginnt in den Krater zu rutschen. Außerdem fällt das senkrecht ausgeworfene Material nun wieder in den Krater zurück und beginnt ihn anzufüllen. Bei kleineren Kratern rutscht der Rand wie bei einem Bergsturz ab, bei größeren Kratern kann sich der eingestürzte Rand – auf Grund des schon vorher etwas flacheren Kraterbodens – terrassenförmig ausbilden, und im Zentrum des Kraters, wo sich Material von allen Seiten trifft, zusammen mit dem sich hebenden Kraterboden zur Bildung eines Zentralberges führen. Diese Phase – die Modifikationsphase – dauert je nach Kratergröße Minuten bis Stunden, und am Ende steht ein Krater, dessen Enddurchmesser ein Vielfaches der Dimensionen des ursprünglichen Projektils ausmacht (für eine Illustration siehe Abb. 7).

Abb. 8: Einige der direkten Folgen eines Einschlages der Größe des „Meteor Crater" in Abhängigkeit von der Entfernung vom Einschlagsort (nach Daten in KRING 1997).

Bei einem Meteoriteneinschlag werden also ungeheure Energiemengen freiwerden, wobei es große Unterschiede zwischen Einschlägen kleiner und großer Körper gibt. Bei kleinen Körpern ist auch deren Zusammensetzung besonders wichtig. Kleinere Steinmeteorite verhalten sich in der Erdatmosphäre anders als Eisenmeteorite, vor allem auf Grund der viel höheren inneren Festigkeit der Eisenmeteorite. Kleinere Objekte werden in der Erdatmosphäre abgebremst und können dabei, auf Grund der inneren Spannungen, zerbrechen. Der Meteor Crater wurde zum Beispiel durch den Einschlag eines Eisenmeteoriten mit etwa 50 Meter Durchmesser gebildet (wobei ein Teil des meteoritischen Materials in Folge der deutlichen Abbremsung in der Atmosphäre „überlebt" hat und nun im Form von Meteoriten um den Krater gefunden wurde). Die dabei freigewordene Energie kann mit der einer Explosion mit 10 Megatonnen TNT verglichen werden. Relativ dazu war die Explosionstärke der Atombombe von Hiroshima nur etwa 20 Kilotonnen TNT äquivalent, also 500-mal weniger Energie! Das Schicksal von Steinmeteoriten vergleichbarer Größe (die aber geringere Masse besitzen) ist anders. Berechnungen zeigen, dass diese Objekte während des Abbremsens in der Atmosphäre auf Grund der inneren Spannungen explodieren. Ein Beispiel einer solchen Explosion ist das sogenannte „Tunguska-Ereignis", wobei am 30. Juni 1908 über den Wäldern Zentralsibiriens eine gewaltige Explosion erfolgte, die eine Waldfläche von zirka 2000 Quadratkilometern zerstörte; die Explosion war bis in 1500 km Entfernung zu hören, und die Luftdruckwelle wurde Stunden später sogar in Europa registriert. Dabei ist ein Steinmeteorit mit einem Durchmesser von etwa 20 bis 50 Metern (je nach Eindringgeschwindigkeit und Winkel) in einer Höhe von etwa 10 Kilometern mit einer Explosionsstärke von etwa 5-10 Megatonnen TNT explodiert (z. B. CHYBA et al. 1993). Kleinere derartige Explosionen in der Atmosphäre sind sogar relativ häufig (siehe auch LEWIS 1997). Obwohl Explosionen von Tunguska-Größe etwa alle hundert Jahre einmal vorkommen (Abb. 6), können solche Ereignisse durchaus lokale Zerstörungen anrichten. Tunguska hat 2000 km^2 verwüstet – im Vergleich: die Fläche Wiens liegt bei knapp über 400 km^2.

Die Bildung auch von kleinen Meteoritenkratern hat ebenfalls drastische Konsequenzen, zumindest für die nähere Umgebung. Die Verwüstungen solcher Einschläge sind schematisch in Abb. 8 dargestellt. Bei etwas größeren Einschlägen sind die Auswirkungen noch drastischer. Im Fall des mittelgroßen Einschlages reicht zum Beispiel noch in einer Entfernung von etwa 200 km die Wärmestrahlung des Feuerballs zur Selbstentzündung von Kleidung ausreicht; neben der thermischen Strahlung und einem starken Erdbeben würden noch Winde mit mindestens 150 km/h Stärke drastische Schäden anrichten. Impakte können also schon bei nur mittelgroßen Einschlägen zu Effekten führen, die man sonst nur von Supervulkanen erwarten darf; dies führt mit großer Sicherheit zum regionalen bis kontinentalen Zusammenbruch von Ackerbau und Viehzucht und einer starken Beeinträchtigung der Wasserversorgung.

Die Folgen von Einschlägen sind also mannigfaltig. Bei Impakten in das Meer kann zusätzlich noch Schaden durch Wasser entstehen. Das beinhaltet sowohl impaktinduzierte Tsunamis (deren Effekte auf Grund der Amplitude der Wellen am Ursprungsort möglicherweise weniger gefährlich sind als seismisch induzierte Tsunamis – z. B. WARD & ASPHAUG 2000), als auch enorme Wassermassen die bei der enormen Hitze eines Einschlages verdampfen und im Form von treibhausaktivem Wasserdampf (und anderer Gase) das Klima der Erde kurz- bis langfristig beinflussen können (z. B. TOON et al. 1997). Im Meerwasser finden sich auch große Mengen an Chlor und Brom, und Evaporitgesteine unter flachem Meerwasser enthalten Sulfat. Bei raschem Ausregnen dieser Verbindungen kommt es zu saurem Regen. In gasförmigem Zustand sind diese Elemente entweder Treibhausgase oder führen zur Zerstörung der Ozonschicht der Erde, mit allen damit verbundenen negativen Auswirkungen (z. B. Erhöhung der Mutationsrate in Lebewesen durch mehrfach verstärkte Bestrahlungsrate mit ultraviolettem Licht der Sonne; siehe COCKELL & BLAUSTEIN 2000).

Impakte und Massensterben in der Erdgeschichte

Allgemeine Bemerkungen

Die biologischen Konzequenzen solcher Ereignisse hängen stark von der Größe und damit der Energie des Einschlages ab. Kleine Ereignisse können lokal katastrophale Auswirkungen haben, aber sollte ein solcher Einschlag aber in einem dicht bewohnten Ballungszentrum erfolgen, kann die Opferzahl bereits in die Millionen reichen. Trotzdem handelt es sich auch dann um eine regional begrenzte Katastrophe, ohne weitreichende Auswirkungen auf die regionale oder globale Landwirtschaft, die Infrastruktur, oder auf das Klima. Große (und damit seltenere) Einschläge können daher durchaus Auswirkungen auf die biologische Entwicklung der Erde haben können. Die Frage der Auswirkungen kann durch das am besten dokumentierte Beispiel diskutiert werden – die Ereignisse an der Kreide-Tertiär-Grenze.

Das Massensterben an der Kreide-Tertiär-Grenze

Die Geschichte der Erforschung dieses Ereignisses ist interessant, da es sich – wie so oft – um eine zufällige Entdeckung gehandelt hat. Ende der 1970er Jahre unter-



Abb. 9: Die „klassische" Kreide-Tertiär (K-T)-Grenze in Gubbio, Italien. An diesem Ort wurde Ende der 1970er Jahre mit geochemischen Methoden die Entdeckung der Spuren eines Asteroideneinschlages am Ende der Kreidezeit gemacht. Links im Bild der Autor (Photo: J. Morrow, San Diego State University, 2007).

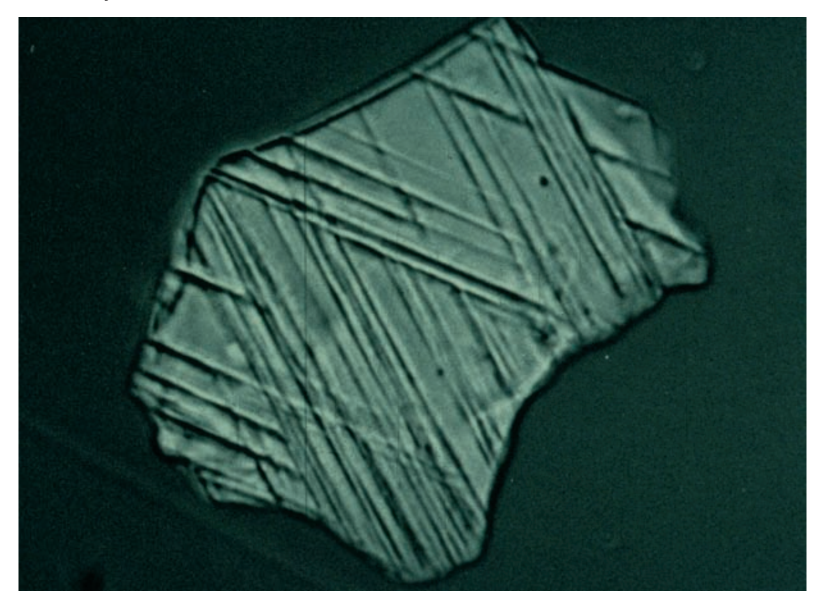


Abb. 10: Geschockter Quarzkristall (Durchmesser etwa 80 Mikrometer) von der Kreide-Tertiär-Grenze bei Teapot Dome, Wyoming, USA (Mikrophoto: B. Bohor, persönl. Mitteilung).

suchte der Geologe Walter Alvarez in Italien Sedimentgesteine aus der Kreidezeit und aus dem darauffolgenden Tertiär, um Aufschlüsse über die tektonische Entwicklung Italiens zu bekommen. Dabei interessierte ihn, wie lange die Ablage dieser Sedimente gedauert hat. Er bat seinen Vater, Physik-Nobelpreisträger Luis Alvarez, um Hilfe. Alvarez Senior schlug vor, die Häufigkeit des Elements Iridium (Ir) in den Gesteinen zu messen, denn dieses Element (wie auch andere Elemente der Platingruppe) sind in irdischen Gesteinen sehr selten, aber in extraterrestrischem Material etwa eine Million mal häufiger. Da auf die Erde ein steter und konstanter Regen an kosmischem Staub niedergeht (etwa 40,000 Tonnen pro Jahr), meinte Alvarez, aus der Menge an Iridium in den Gesteinen die Sedimentationsgeschwindigkeit ableiten zu können – viel Iridium bedeutete eine langsame Sedimentationsrate, wenig Iridium eine schnellere, da das Iridium dabei durch irdische Gesteine stark verdünnt wird. Zufällig haben Alvarez und Kollegen dann aber auch eine dünne Schicht an Tonmineralen, die die paläontologische Kreide-Tertiärgrenze markiert, analysiert. Die überraschenden Ergebnisse zeigten, dass in den Gesteinen der Grenzschicht bei Gubbio, Italien (Abb. 9) derart hohe Gehalte an Iridium (tausende Male höher als normal) – und dann auch der anderen Platinmetalle – dass eine unmöglich langsame Sedimentationsrate resultieren würde.

Die einzige Erklärung war, dass diese Tonschicht das Resultat eines gigantischen Einschlags eines extraterrestrischen Körpers war. Die daraus folgende Publikation von ALVAREZ et al. (1980) hat Wissenschaftsgeschichte geschrieben, denn zum ersten Mal seit der Mitte des 19. Jahrhunderts wurden Katastrophen als wichtige Prozesse in der Geologie vorgeschlagen. Anfangs gab es viel Widerstand aus den Kreisen der über extraterrestrische Ereignisse nicht informierten Geologen und Paläontologen. Nach und nach wurden allerdings weitere Indizien dafür gefunden, dass tatsächlich ein Riesen-Impakt stattgefunden haben muss, vor allem die Entdeckung von geschockten Mineralen in der Grenzschicht (BOHOR et al. 1984, 1987). Abb. 10 zeigt ein Beispiel eines geschockten Quarzkristalls von der Kreide-Tertiär-Grenze. Die hohen Konzentrationen extraterrestrischer Metalle in diesen Gesteinen wurden wurden an Kreide-Tertiär-Grenzen rund um die Erde bestätigt (Abb. 11).

Ein unerwartetes Ergebnis war die Auffindung einer relativ dicken Rußschicht, die in den Gesteinen der K-T Grenze auf der ganzen Welt gefunden wurde (Abb. 11). Geochemikern gelang die Isolierung von Spurenbestandteilen in der Rußschicht, und man konnte aus der Rußmenge und der chemischen und Isotopen-Zusammensetzung nachweisen, dass gigantische Waldbrände und auch verbrannte Kohlenwasserstoffe für die Rußschicht verantwortlich waren (siehe GILMOUR 1998; GILMOUR et al. 1990; WOLBACH et al. 1990). Die Rußmenge zeigt, dass damals mehr Wälder (oder äquivalente Kohlenstoffmengen in Form von Kohlenwasserstoffen) gebrannt haben als heutzutage auf der ganzen Erde vorhanden sind. Dies paßt gut, denn am Ende der Kreidezeit war das Klima deutlich wärmer als heute, und daher gab es auch eine wesentlich dichtere Vegetation als heute. Berechnungen zeigten, dass die glühenden Impaktgesteine bei einem Rieseneinschlag fast um die gesamte Welt verteilt auf die Erde stürzten und dabei Waldbrände auslösen konnten.

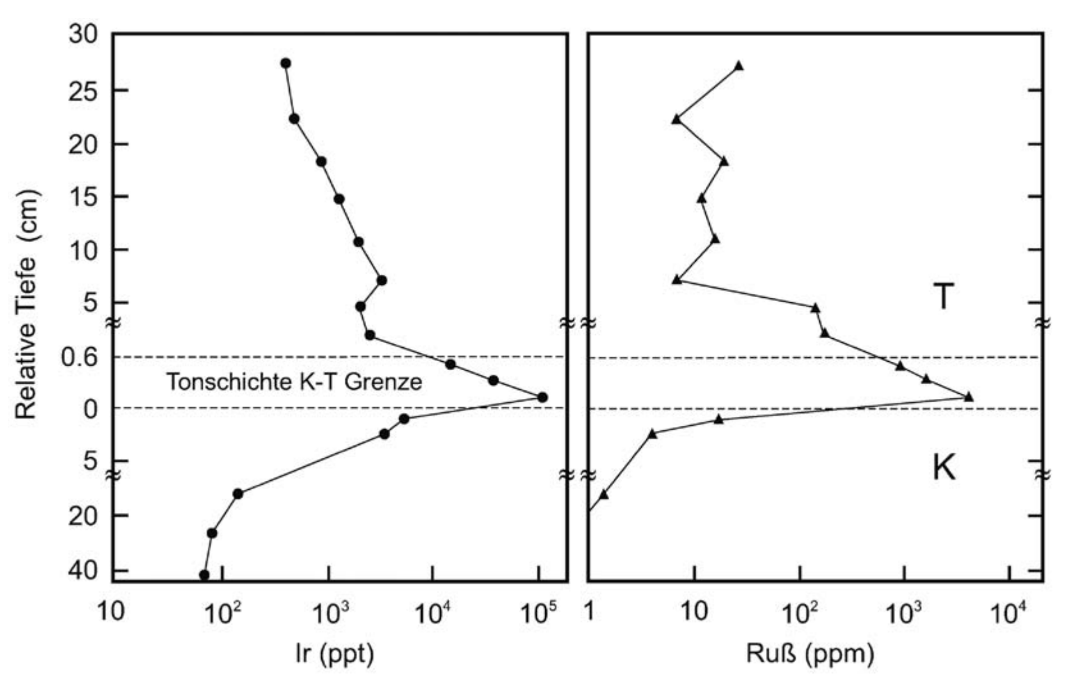


Abb. 11: Iridium- und Rußkonzentrationen in den Gesteinen der Kreide-Tertiär-Grenze, am Beispiel einer Lokalität in Neuseeland (siehe z. B. KOEBERL 1996, und KOEBERL & MARTINEZ-RUIZ 2003). Die relative Tiefe in Zentimetern ist gemessen ab der K-T Grenze. Die Rußmenge (Daten in ppm = parts per million oder 10^{-6} g/g) erreicht etwa ein halbes Gewichtsprozent, während die Iridiumkonzentration (Daten in ppt = parts per trillion oder 10^{-12} g/g) bis fast 100 ppb erreicht – 20 % einer typischen meteoritischen Konzentration.

Im Laufe der 1980er Jahre wurden dann noch viele Anzeichen dafür gefunden, dass es einen Einschlag zu dieser Zeit gegeben hatte (siehe z. B. Arbeiten in SHARPTON & WARD 1990; KOEBERL 1996). Anfang der 1990er Jahre wurde dann endlich auch der Ursprungskrater gefunden – der Chicxulub-Krater wurde unter einer jüngeren, ihn versteckenden Gesteinsschicht auf der mexikanischen Halbinsel Yucatan entdeckt (z. B. HILDEBRAND et al. 1991). Der Krater, von dem an der Oberfläche so gut wie nichts zu sehen ist, wurde mit geophysikalischen Methoden gefunden und vermessen (Abb. 12); sein Durchmesser beträgt 200 km. Untersuchungen an Bohrkernen zeigten, dass die Schmelzgesteine genau das richtige Alter von 65 Millionen Jahre haben, und die geochemische Zusammensetzung der Kratergesteine ist auch gut vergleichbar mit der Zusammensetzung der Auswurfmaterialien in den Gesteinen der K-T Grenze rund um die Welt. Vor kurzer Zeit wurde eine wissenschaftliche Tiefbohrung durch das Interbational Continental Scientific Drilling Program (ICDP) am Außenrand des Chicxulub-Kraters niedergebracht (Abb. 12)

Wichtiger als die Entdeckungsgeschichte ist es aber, zu wissen, welche Prozesse beim Einschlag eines Körpers mit 10 Kilometern Durchmesser auf der Erde ablaufen. Der Asteroid ist mit einer Geschwindigkeit von vielleicht 20, 30, oder sogar 40 Kilometern pro Sekunde auf die Erde aufgeschlagen. Bei dieser Geschwindigkeit dringt der Körper in nur ein oder zwei Sekunden durch den Großteil der Erdatmosphäre. Nachdem der Körper auf den Boden getroffen ist, beginnt der Vorgang der Kraterbildung wie bereits oben beschrieben. Nach etwa einer Sekunde war der Körper fast vollständig verdampft. Kurze Zeit später hatte der Krater seine größte Tiefe erreicht, von etwa 40 Kilometern (ein Teil davon ist echter „Auswurf", ein Teil nur plastische Verformung des Untergrundes). Danach begann sich der Kraterboden wieder zu heben, um den Zentralberg zu bilden, während der Kraterrand abrutschte.

Der Einschlagsort war mit einigen hundert Metern Meerwasser und einer kilometerdicken Schicht von Carbonat- und Sulfat-reichem Gestein (Kalkstein/Do-

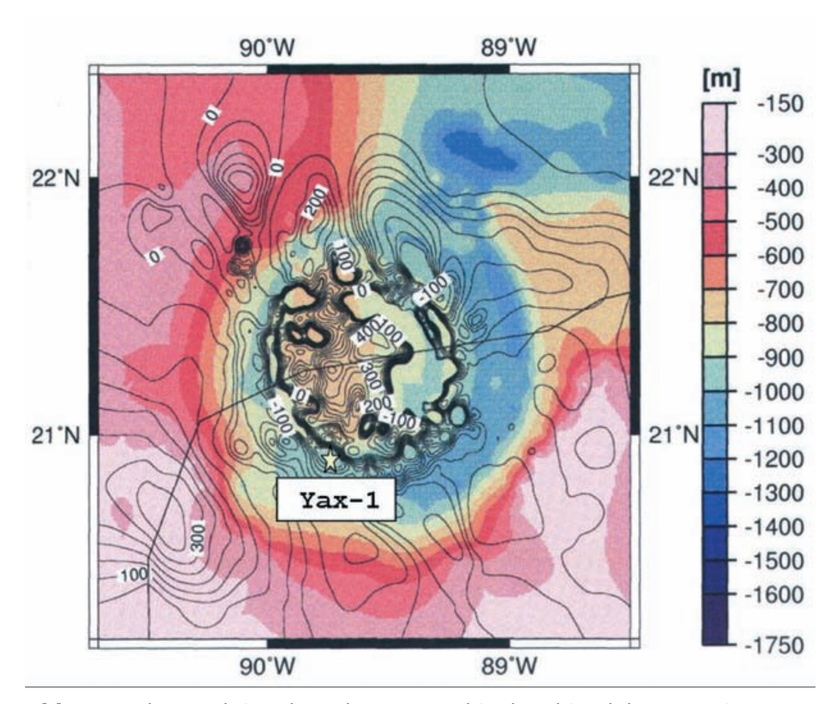


Abb. 12: Rekonstruktion der Paläo-Topgraphie des Chicxulub-Kraters in Mexiko (durch Subtraktion der Mächtigkeit der Tertiären (post-impakten) Gesteine, auf der Basis von geophysikalischen daten (nach KOEBERL & MILKEREIT 2007). Das ICDP Bohrloch Yax-1 ist außerhalb der zentralen magnetischen Anomalien und des Schmelzkörpers innerhalb des Kraters.



Abb. 13: Rekonstruktion des Chicxulub-Einschlages im flachen Meerwasser, das damals einen Teil der heutigen Halbinsel Yukatan (Mexiko) bedeckte. Einige Sekunden nach dem Einschlag beginnt gerade die Auswurfphase, und Material aus dem Krater, dessen Bildung gerade beginnt, wird ausgeworfen. (Ölbild, D. Jalufka, Wien, 1994/2005).

lomit und Anhydrit) bedeckt. Unter Schockeinfluss setzen diese Gesteine eine große Menge an Kohlendioxid und Schwefeldi- und -trioxid frei – viele tausend Kubikkilometer davon (z. B. CHEN et al. 1994; GUPTA et al. 2001; SIGURDSSON et al. 1992; YANG & AHRENS 1998). Mittlerweile laufen aber Erdbebenwellen mit einer Stärke von etwa 11 bis 12 auf der Richter-Skala vom Einschlagsort weg. Da der Einschlag in flachem Meerwasser erfolgte, bilden sich Tsunamis, die in Küstennähe viele hundert Meter Höhe erreichen können. Glühende Gesteinsbrocken, die beim Einschlag ausgeworfen wurden, fallen nun wieder auf die Erde zurück – noch Zehntausende von Kilometern vom Einschlagsort entfernt – und setzen die Wälder in Brand. Die in die Atmosphäre gelangten Schwefel-Gase regneten teilweise in Form von saurem Regen wieder aus (z. B. MARUOKA & KOEBERL 2003; LYONS & AHRENS 2003). Auch die Ozonschicht wurde zerstört.

Tab. 2: Effekte und deren Zeitskala nach einem Einschlag in der Größenordnung des Kreide-Tertiär-Grenze-Einschlages (ca. 10 km großer Asteroid in flaches Meerwasser).

Umweltfaktor	Zeitskala
Plasma des glühenden Feuerballs	Minuten
Hitze von glühenden Auswurfmassen	Minuten – Stunden
„Hypercanes" – Winde mit mehr als Hurrikan-Stärke	Stunden
Tsunamis und Erdbeben	Stunden
Impaktinduzierte Brände	Wochen bis Monate
Staubmassen um den Globus – Dunkelheit und Kälte	Monate bis Jahre
Saurer Regen (Salzsäure, Salpetersäure….)	Monate bis Jahre
Aerosole in der Stratosphäre (Abkühlung)	Jahre bis Jahrzehnte
Vernichtung der Ozonschicht (Mutationen)	Jahrzehnte bis Jahrhunderte
Glashauseffekt – atmosphär. Wasser (Erwärmung)	Jahrzehnte bis Jahrhunderte
Giftstoffe und Mutagene	Jahrhunderte
Glashauseffekt durch Kohlendioxid (Erwärmung)	Jahrtausende
Störung des Klimas	Jahrmillionen

Nachdem die Erdbebenwellen um die Welt gelaufen und die Waldbrände verlöscht waren, war das Schlimmste noch nicht vorbei. Viele tausend Kubikkilometer Staub waren in die Stratosphäre geschleudert worden, und diese Staubmassen, die erst im Lauf von einigen Jahren wieder langsam zur Erde zurückfielen, verhinderten, dass das Sonnenlicht mit seiner vollen Intensität auf die Erde gelangte. Die Staubmassen, die bei dem Chicxulub-Impakt bis in die Stratosphäre gelangten, hatten eine Verweilzeit – je nach der Teilchengröße – in der Atmosphäre von wenigen Stunden bis zu etwa 1-2 Jahren. Ein Temperatursturz war die Folge, die Photosynthese kam zum Erliegen, und die durch die Brände sowieso schon stark geschädigte Nahrungskette brach zusammen. Die Biosphäre der Erde war stark gestört. Nun aber kam es – nach dem Absinken des Staubes auf die Erde – zum umgekehrten Effekt. Die enormen Kohlendioxidmengen, die durch die Schock-Entgasung in die Atmosphäre gelangten, riefen nun – in viel stärkerem Ausmaß als heutzutage – eine Art Treibhauseffekt und damit eine starke globale Erwärmung hervor (TOON et al. 1997). Dieser Effekt dauerte viele tausend Jahre, wahrscheinlich zehntausende Jahre. Am Ende dieser Ereignisse waren nicht nur die Saurier oder die Ammoniten unwiederbringlich verschwunden, sondern auch viele andere Tier- und Pflanzenarten. Etwa die Hälfte aller damals lebenden Tier- und Pflanzenarten starben aus – und die Umweltbedingungen für die Überlebenden waren ebenfalls denkbar schlecht. Eine Zusammenfassung der Effekte eines solchen Einschlages ist in Tabelle 2 gegeben.

Diese Auswirkungen, und der Zusammenhang zwischen Chicxulub und dem Massensterben an der K-T Grenze, wurden sowohl aus geochemischen, petrographischen, und mikropaläontologischen Beobachtungen, Impaktexperimenten, wie auch aus numerischen Simulationsberechnungen abgleitet, und sind ziemlich gut etabliert und unter Geowissenschaftern auch mehrheitlich akzeptiert (z. B. SMIT 1999), obwohl es nach wie vor einige wenige – dafür aber umso vokalere – Proponenten einer Hypothese gibt, in der Chicxulub einige hunderttausend Jahre älter als der eigentliche K-T Impakt sei (z. B. KELLER et al. 2004). Keller und Kollegen argumentieren zum Beispiel damit, dass in der Kraterfüllung des Chicxulub-Kraters über den Impaktbrekzien (Sueviten) noch kretazische Gesteine vorhanden seien, bevor tertiäre Schichten nachweisbar sind. Abgesehen

von Problemen bei der Bestimmung der vorgeblich kretazischen Fossilien ist es nur logisch, dass bei einem so großen Krater im flachen Meerwasser die Tsunamiwellen Umgebungsmaterial (klarerweise aus der Kreide) in den Krater zurückspülen, und auch ein Kraterrand aus Ejekta die Sedimentation verlangsamt und daher durchaus eine ruhigere Sedimentationsumgebung vorhanden war. Außerdem ignoriert diese Interpretation die geochemischen Indizien, die ja Anfang der 1990er Jahre zur Identifikation des Chicxulub Kraters – durch Vergleich der geochemischen Charakteristika der Auswurfmaterialien an der K-T Grenze und jener der Kraterbrekzien und Schmelzen – geführt hat (z. B. BLUM & CHAMBERLAIN 1992; BLUM et al. 1993; KAMO & KROGH 1995). Die eher einseitige Interpretation von Keller und Kollegen wird ausführlich in der detaillierten Arbeit von SCHULTE et al. (2006) diskutiert und widerlegt.

Die Daten belegen also relativ deutlich, dass am Ende der Kreidezeit der größte bekannte Impakt erfolgte, der innerhalb der letzten mehreren hundert Millionen Jahre auf der Erde nachweisbar ist. Abb. 13 zeigt eine künstlerisch-schematische Darstellung der ersten Sekunden des Chicxulub-Impaktes. Dieser Einschlag hat einen Ort getroffen, der reich an Carbonat- und Evaporitgestein war. Dadurch kam es zu einem starken Eintrag von großen Mengen klimaaktiver Gase in die Atmosphäre, die zusammen mit den enormen Staubmengen zu kurz- und langfristigen drastischen Änderungen der Umweltbedingungen führten – zusätzlich zu den direkt mit dem Einschlag verbundenen katastrophalen Auswirkungen wie Feuerball, Brände, Erdbeben, Tsunami, Ejekta-Ablagerungen, saurer Regen, etc. Die Summe dieser Umwelteinflüsse, zusammen mit einigen der Auswirkungen des zu dieser Zeit möglicherweise noch aktiven Dekkan-Vulkanismus (SELF et al. 2006), sind für ein Massensterben mehr als ausreichend.

Das Massensterben an der Perm-Trias-Grenze

Auf Grund der drückenden Beweislage im Falle des Massensterbens am Ende der Kreidezeit begann sofort die Suche nach weiteren/ähnlichen Korrelationen zwischen Einschlägen und Massensterben, zum Beispiel an der Perm-Trias-Grenze vor 251 Millionen Jahren, oder der Trias-Jura-Grenze vor 200 Millionen Jahren, an. Einen guten Überblick über diese frühe Diskussion geben RAMPINO & HAGGERTY (1996). Im Gegensatz zu den Ereignissen an der Kreide-Tertiär-Grenze, wo es ganz deutliche Hinweise auf einen großen Impakt gibt, ist die Situation für die Perm-Trias-Grenze weit weniger klar. Die Suche nach Hinweisen auf einen großen Impakt, der mit der P-Tr Grenze zeitgleich wäre, hat bisher wenige bis keine, und eher widersprüchliche, Resultate gebracht. Da an der P-Tr Grenze mehr Arten ausgestorben sind als an der K-T Grenze (und zu dieser Zeit sind etwa die Hälfte aller damals lebenden Tier- und Pflanzenarten verschwunden), müßte ein damaliger Impakt noch größer gewesen sein als jener an der K-T Grenze. Rein statistisch wird ein Einschlag dieser Größenordnung nur etwa alle 0.5–1 Milliarde Jahre einmal erwartet (Abb. 6). Von größerer Bedeutung ist allerdings, dass keine eindeutigen Anzeichen eines Einschlages in den Gesteinen der Perm-Trias-Grenze vorhanden sind.

Eine der am besten untersuchten Lokalitäten der P-Tr Grenze ist in Österreich in den Karnischen Alpen an der Grenze zwischen Kärnten und Norditalien, am Gartnerkofel. Zum Zeitpunkt der Ablagerung der Grenzgesteine war die Gegend der heutigen Karnischen Alpen unter Wasser; es handelte sich dabei um eine marine Grenze. HOLSER et al. (1989) und HOLSER & SCHÖNLAUB (1991) beschreiben Untersuchungen an einem Bohrkern, der die Perm-Trias-Grenze erfasst. So zeigte sich zum Beispiel eine Iridium-Anomalie von einigen hundert ppt an der P-Tr Grenze (sowie in einer anderen Tiefe). Dies könnte als Hinweis auf ein Impaktereignis verstanden werden – ähnliche Anomalien wurden auch an anderen Lokalitäten auf der Welt gefunden (siehe Zusammenfassung in RAMPINO & HAGGERTY 1996). Auch Berichte über einige mögliche geschockte Quarze an P-Tr Grenzen in Australien und der Antarktis (RETALLACK et al. 1998), Schwefelisotope, die von einem großen Einschlag herstammen sollten (KAIHO et al. 2001), mögliche extraterrestrische Fullerene (POREDA & BECKER 2003), und sogar ein riesiger Krater vor der Westküste Australiens (BECKER et al. 2004) wurden publiziert. Gibt es also doch Hinweise auf ein großes Einschlagereignis vor 251 Millionen Jahren?

Bei genauerer Überprüfung der Beobachtungen lösen sich die sogenannten „Beweise" sehr rasch in falsche Interpretationen und Wunschdenken auf. Die Iridiumanomalien gibt es sehr wohl – nur sind die absoluten Mengen an Iridium um mehrere Größenordnungen geringer als jene an der K-T Grenze (Abb. 14). Die angeblichen geschockten Quarze sind sehr höchst selten. Nicht gerade, was man von einem Einschlag, der größer gewesen sein soll als jener bei Chicxulub, erwarten würde. Im Detail verpuffen dann alle Indizien. Die Interelementverhältnisse der Platinmetalle in den P-Tr Schichten, die erhöhte Iridiumgehalte haben, sind nicht meteoritisch, sondern typisch irdisch (diagenetisch) (KOEBERL et al. 2004), und die Signatur der Osmiumisotope – die an der K-T Grenze wunderbare meteoritische Werte ergeben – sind an der P-Tr Grenze rein irdisch – krustal (KOEBERL et al. 2004). Fullerene und die damit verbundenen extraterrestrischen Helium-3 Anomalien konnten nicht bestätigt werden (FARLEY & MUKHOPADHYAY 2001; FARLEY et al. 2005). Die Schwefelisotopen-Hypothese ist geochemisch, himmelsmechanisch und

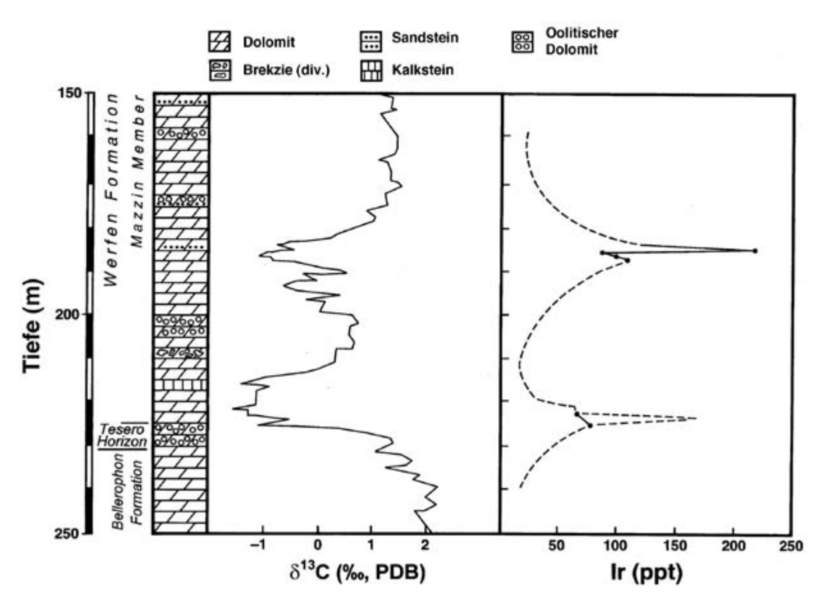


Abb. 14: Iridium-Anomalien und Kohlenstoffisotope an der Perm-Trias-Grenze am Gartnerkofel, Österreich. Die Untersuchungen von KOEBERL et al. (2004) haben gezeigt, dass es sich hierbei um rein terrestrische Signaturen handelt und es keine Anzeichen eines Impaktereignisses gibt.

impakt-physikalisch unmöglich (KOEBERL et al. 2002), und genaue transmissions-elektronenmikroskopische Nachuntersuchungen der angeblich geschockten Quarze haben nachgewiesen, dass es sich um rein tektonische Deformationen handelt – keine Spur von Schock (LANGENHORST et al. 2005). Der angebliche Krater vor der Küste von Westaustralien ist besonders problematisch – die Altersbestimmung ist nicht nachvollziehbar (RENNE et al. 2004), die Gesteine sind vulkanisch, und die detaillierten geophysikalischen Daten zeigen kein Anzeichen einer kraterähnlichen Struktur (MÜLLER et al. 2005).

Im Gegensatz zur Situation an der K-T Grenze, wo die Eruption der Deccan-Flutbasalte, die in der Tat wenigstens 1-2 Millionen Jahre vor dem Chicxulub Impaktereignis begann, eine eher untergeordnete Rolle gespielt zu haben scheint, dürfte die Eruption der viel voluminöseren Sibirischen Flutbasalte katastrophale globale Auswirkungen ausgelöst haben (siehe z. B. MARUOKA et al. 2003, GRARD et al. 2005). Allerdings ist der exakte Zusammenhang zwischen dem Flutbasalt-Vulkanismus und dem Massensterben noch nicht geklärt. Eines ist allerdings sicher: Anzeichen für einen gigantischen Impakt gibt es an der Perm-Trias-Grenze nicht.

Jura-Kreide-Grenze

Das Massensterben am Übergang von der Jura zur Kreide vor 145 Millionen Jahren ist von kleinerem Ausmaß als jene an den K-T oder P-Tr Grenzen, und es ist nicht sicher, ob die paläontologischen Signaturen synchron im borealen und australen Bereich sind. Es gibt drei Meteoritenkrater, deren Alter mit jenem der J-K Grenze innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmen, und zwar der 25-km-Durchmesser Gosses Bluff Krater in Australien (143 Ma), der 40 km große Mjølnir-Krater in der Barent-See nördlich von Norwegen (143 Ma), und die ca. 70 km große Morokweng-Impaktstruktur in Südafrika (145 Ma). Letztere Impaktstruktur hat zwar das „richtige" Alter (KOEBERL et al. 1997), ist aber mit ziemlicher Sicherheit nicht groß genug (REIMOLD et al. 1999), um globale Auswirkungen gehabt zu haben. Es ist natürlich möglich, dass all diese – und vielleicht noch andere, bisher nicht entdeckte – Einschlagsereignisse zu einer Umweltveränderung beigetragen haben; dies klar nachzuweisen ist allerdings bisher nicht möglich gewesen.

Trias-Jura-Grenze

Die Trias-Jura-Grenze (ca. 200 Ma) markiert eines der 5 großen Massensterben, und auch hier ist eine Verbindung mit einem Impaktereignis nicht klar nachzuweisen. Es gibt zwar Hinweise auf geschockte Quarze an Tr-J Grenzen sowohl in Italien wie in Österreich, aber diese Untersuchungen konnten bisher nicht bestätigt werden. An verschiedenen Lokalitäten in den USA konnten OLSEN et al. (2002) eine geringe Iridium-Anomalie nachweisen; diese Messungen wurden an anderen Lokalitäten von TANNER & KYTE (2005) bestätigt. Allerdings ist nicht klar, ob es sich um ein extraterrestrisches oder terrestrisch-diagenetisches Signal handelt; diese Untersuchungen sind noch im Gange. Sollte es eine extraterrestrische Signatur sein, fehlt bisher der dazugehörige Einschlagskrater. Es gibt zwar einen großen Krater (Manicouagan, 100 km Durchmesser, in Kanada), aber der ist mit 214 Millionen Jahren zu alt, und steht vermutlich mit einer Ejektalage, die in England in Gesteinen der späten Trias gefunden wurde (WALKDEN et al. 2002), in Verbindung. Mit anderen Worten, für die Tr-J Grenze ist ein Impaktereignis nicht unwahrscheinlich, aber die Daten-Lage ist unklar, und heute kann noch keine eindeutige Aussage über einen möglichen Zusammenhang gemacht werden.

Eozän-Oligozän-Grenze

Eine andere wichtige Zäsur ist die Eozän-Oligozän-Grenze vor etwas über 33 Millionen Jahren. Messungen von extraterrestrischem Helium-3 zeigen hier eine erhöhte Akkretionsrate extraterrestrischen Materials (FARLEY et al. 1998; MUKHOPADHYAY et al. 2001), und es gibt auch einige recht große Einschlagskrater – wie den 100 km großen Popigai-Krater in Sibirien oder den 85 km großen Chesapeake-Bay-Krater an der Ostküste der USA (POAG et al. 2004) – aber beide Krater, und die mit ihnen verbundenen globalen Ejekta-Horizonte sind etwas älter als die E-O Grenze, mit ca. 35 Millionen Jahren. Zu diesem Zeitpunkt sind zwar Auswirkungen

auf das Klima nachweisbar (BODISELITSCH et al. 2004), aber diese waren nicht besonders stark und scheinen kein Massensterben verursacht zu haben. Auch zu keinen anderen Zeiten in der Erdgeschichte ist es bisher gelungen, eindeutige Hinweise für einen Zusammenhang zwischen Impakten und Massensterben zu finden.

Ausblick

Die Literatur zur Impaktforschung hat in jüngerer Zeit an Umfang zugenommen. Dies betrifft vor allem Artikel in Fachzeitschriften und populäre Bücher (vornehmlich in englischer Sprache; es wird aber auf ein deutschsprachiges Buch des Autors hingewiesen: KOEBERL 1998a). Es gibt bisher nur drei Fachbücher, die verschiedene Themen der Impaktforschung behandeln: MELOSH (1989), FRENCH (1998), und MONTANARI & KOEBERL (2000). Der interessierte Leser sei für weiterreichende Literatur auf diese Bücher verwiesen. Die Gefahr von Impaktereignissen und deren Einfluss auf die Geo- und Biosphäre wird nunmehr intensiver denn ja diskutiert (siehe z. B. GEHRELS 1994; CHAPMAN & MORRISON 1994; LEWIS 1996; TOON et al. 1997; ATKINSON et al. 2000; COLLINS et al. 2005).

Die Untersuchungen der letzten Jahre – vor allem nach dem Anstoß, den die Entdeckung des Impaktes am Ende der Kreidezeit gegeben hat – haben gezeigt, dass Impaktereignisse in der Geschichte der Erde wesentlich wichtiger waren als von Geologen noch vor wenigen Jahren angenommen. Erst als unwiderlegbare Beweise für den gigantischen Einschlag am Ende der Kreidezeit als Ursache des K-T Massensterbens gefunden wurden, hat sich – beginnend vor etwa 15 Jahren – das Bild gewandelt. Derart apokalyptische Vorgänge wie am Ende der Kreidezeit, die zu einem der größten Massensterben in der Erdgeschichte geführt haben (z. B. Arbeiten in RYDER et al. 1996, und KOEBERL & MACLEOD 2002), sind aber in der geologischen Vergangenheit unseres Planeten nicht besonders häufig. Mit heutigem Wissensstand ist nur eines der bekannten großen Massensterben, eben jenes am Ende der Kreidezeit, ziemlich eindeutig einem Impaktereignis zuzuschreiben. Der Beitrag der Eruption der Deccan-Flutbasalte war zwar vorhanden, wird aber als nicht besonders bedeutend für das altersmäßig sehr rasche Massensterben gesehen (z. B. RAVIZZA & PEUKKER-EHRENBRINK 2003). Im Fall der P-Tr Grenze scheint es umgekehrt zu sein – die Auswirkungen der viel stärkeren Sibirischen Flutbasalt-Eruptionen scheinen zu dominieren, während bisher keine eindeutigen Spuren eines großen Impaktes nachgewiesen werden konnten. Auch im späten Eozän kennt man eine weltweite Ejektaschicht, die vermutlich von den Popigai und/oder Chesapeake Bay-Kratern stammt. Bei dieser Lage sind aber keine direkten biologischen Konsequenzen nachzuweisen. Von einem der ältesten bekannten Krater – Sudbury – wurde mit ziemlicher Sicherheit Auswurf gefunden (ADDISON et al. 2005), und CHADWICK et al. (2001) vermuteten, dass eine ungewöhnliche Gesteinsschichte in Süd-Grönland entweder mit Sudbury oder sogar Vredefort zu korrelieren sei. Aber auf Grund des hohen Alters (ca. 2 Milliarden Jahre) und der Einfachheit der damaligen Biosphäre sind heute keine biologischen Auswirkungen mehr nachweisbar.

In anderen Fällen sind die Verbindungen zwischen Massensterben und Impakterieignissen nicht genau nachweisbar, und zwar auf Grund entweder der Differenzen zwischen radiometrischer und biostratigraphischer Datierung, oder auf Grund der anhaftenden Unsicherheiten physikalischer Altersbestimmungsmethoden, oder weil die Signale einfach nicht eindeutig genug sind. Es mag zwar biologische Auswirkungen eines Einschlages gegeben haben, aber nach vielen Millionen oder hunderten Millionen Jahren sind diese eben nicht mehr genau nachweisbar. Einschlagsereignisse können sehr wohl lokal, regional, oder sogar kontinental Verwüstungen anrichten, und für viele Todesfälle in der Pflanzen und Tierwelt (oder sogar Menschen) verantwortlich sein, aber wenn auch nur einige wenige Exemplare einer Gattung überleben, ist der biologische Effekt eines Impaktereignisses paläontologisch und chemostratigraphisch nicht mehr nachweisbar. Man sollte daher die Gefahr von Impakten nicht überschätzen, aber diese Ereignisse mit anderen „Geohazards" vergleichen. Aus der Untersuchung von Impaktkratern und deren Effekten auf der Erde kann man viel über die Konsequenzen zukünftiger Ereignisse lernen.

Zusammenfassung

Einschläge außerirdischer Körper (Kleinplaneten; Kometenkerne) auf der Erde zählen zu den spektakulärsten und energiereichsten geologischen Prozessen, die wir kennen. Auf Grund von geologischen Untersuchungen, zusammen mit astronomischen Erkenntnissen, kann man die Häufigkeit und die Auswirkungen solcher Einschläge in der Erdgeschichte ableiten. Hier werden nach einer kurzen Einführung zum Thema Einschläge und Einschlagskrater der Ursprung der einschlagenden Körper im Sonnensystem (Kleinplaneten und Kometen) besprochen, gefolgt von einer Diskussion der physikalischen Parameter von typischen Einschlägen und deren Folgen auf die Umwelt. Auch die Charakteristika und Auswirkungen von Meteoriteneinschlägen werden diskutiert. Danach folgt eine ausführliche Beschreibung der Ereignise an der Kreide-Tertiär-Grenze. Zu dieser Zeit, vor 65 Millionen Jahren, ist der größte Einschlag eines außerirdischen Körpers, der im Laufe der letzten hunderten Millionen Jahren auf der Erde nachweisbar ist, er-

folgt, mit katastrophalen Auswirkungen auf die Biosphäre. Bei anderen Massensterben in der Erdgeschichte (z.B. der Perm-Trias-Grenze oder Trias-Jura-Grenze) sind allerdings solche Einschläge nicht mit Sicherheit nachweisbar, und es gibt Anzeichen für verschiedene Mechanismen, die zu Massensterben führen können.

Danksagung

Viele Kollegen haben im Laufe der Jahre mit mir an relevanten Arbeiten kooperiert, und mit Diskussionen geholfen. Die Arbeiten des Autors werden seit Jahren dankenswerterweise vom Österreichischen Forschungsfonds FWF finanziell unterstützt.

Literatur

ADDISON A.D., BRUMPTON G.R., VALLINI D.A., MCNAUGHTON N.J., DAVIS D.W., KISSIN S.A., FRALICK P.W. & A.L. HAMMOND (2005): Discovery of distal ejecta from the 1850 Ma Sudbury impact event. — Geology **33**: 193-196.

ALVAREZ L.W., ALVAREZ W., ASARO F. & H.V. MICHEL (1980): Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. — Science **208**: 1095-1108.

ATKINSON H., TICKELL C. & D. WILLIAMS (2000): Report of the Task Force on Potentially Hazardous Near Earth Objects. — UK Government, September 2000, British National Space Center, London: 1-56.

BECKER L., POREDA R.J., BASU A.R., POPE K.O., HARRISON T.M., NICHOLSON C. & R. IASKY (2004): Bedout: a possible end-Permian impact crater offshore of Northwestern Australia. — Science **304**: 1469-1476.

BLUM J.D. & C.P. CHAMBERLAIN (1992): Oxygen isotope constraints on the origin of impact glasses from the Cretaceous-Tertiary boundary. — Science **257**: 1104-1107.

BLUM J.D., CHAMBERLAIN C.P., HINGSTON M.P., KOEBERL C., MARIN L.E., SCHURAYTZ B.C. & V.L. SHARPTON (1993): Isotopic comparison of K-T boundary impact glass with melt rock from the Chicxulub and Manson impact structures. — Nature **364**: 325-327.

BODISELITSCH B., MONTANARI A., KOEBERL C. & R. COCCIONI (2004): Delayed climate cooling in the Late Eocene caused by multiple impacts: high-resolution geochemical studies at Massignano, Italy. — Earth and Planetary Science Letters **223**: 283-302.

BOHOR B.F, FOORD E.E., MODRESKI P.J. & D.M. TRIPLEHORN (1984): Mineralogical evidence for an impact event at the Cretaceous/Tertiary boundary. — Science **224**: 867-869.

BOHOR B.F., MODRESKI P.J., E.E. FOORD & (1987): Shocked quartz in the Cretaceous/Tertiary boundary clays: Evidence for global distribution. — Science **236**: 705-708.

CHADWICK B., CLAEYS P. & B.M. SIMONSON (2001): New evidence for a large Palaeoproterozoic impact: spherules in a dolomite layer in the Ketilidian orogen, South Greenland. — Journal of the Geological Society of London **158**: 331-340.

CHAPMAN C.R. & D. MORRISON (1994): Impacts on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazard. — Nature **367**: 33-40.

CHEN G., TYBURCZY J.A. & T.J. AHRENS (1994): Shock-induced devolatilization of calcium sulfate and implications for K-T extinctions. — Earth and Planetary Science Letters **128**: 615-628.

CHYBA C.F., THOMAS P.J. & K.J. ZAHNLE (1993): The 1908 Tunguska explosion: Atmospheric disruption of a stony asteroid. — Nature **361**: 40-44.

COCKELL C.S. & A.R. BLAUSTEIN (2000): "Ultraviolet spring" and the ecological consequences of catastrophic impacts. — Ecology Letters **3**: 77-81.

COLLINS G.S. MELOSH H.J. & R.A. MARCUS 2005: Earth impact effects program: A web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth. — Meteoritics and Planetary Science **40**: 817-840.

Earth Impact Database (2007): Online-Datenbank auf: http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/.

FARLEY K.A. & S. MUKHOPADHYAY (2001): An extraterrestrial impact at the Permian-Triassic Boundary? — Science **293**: 2343a.

FARLEY K.A., MONTANARI A., SHOEMAKER E.M. & C.S. SHOEMAKER (1998): Geochemical evidence for a comet shower in the late Eocene. — Science **280**: 1250-1253.

FARLEY K.A., WARD P., GARRISON G. & S. MUKHOPADHYAY (2005): Absence of extraterrestrial ^{3}He in Permian-Triassic age sedimentary rocks. — Earth and Planetary Science Letters **240**: 265-275.

FRENCH B.M. (1998): Traces of catastrophe: A handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures. — LPI Contribution **954**, Lunar and Planetary Institute, Houston: 1-120.

GEHRELS T. (Ed.) (1994): Hazards Due to Comets & Asteroids. — Univ. of Arizona Press, Tucson: 1-1300.

GILMOUR I. (1998): Geochemistry of carbon in terrestrial impact processes. — In: GRADY M.M., HUTCHISON R., MCCALL G.J.H. & D.A. ROTHERY (Eds), Meteorites: Flux with Time and Impact Effects. Geological Society of London, Special Publication **140**: 205-216.

GILMOUR I., WOLBACH W.S. & E. ANDERS (1990): Early environmental effects of the terminal Cretaceous impact. In: SHARPTON VL, WARD PD (Eds) Global Catastrophes in Earth History. — Geological Society of America, Special Paper **247**: 383-390.

GRARD A., FRANCOIS L.M, DESSERT C., DUPRE B. & Y. GODDERIS (2005): Basaltic volcanism and mass extinction at the Permo-Triassic boundary: Environmental impact and modeling of the global carbon cycle. — Earth and Planetary Science Letters **234**: 207-221.

GUPTA S.C., AHRENS T.J. & W. YANG (2001): Shock-induced vaporization of anhydrite and global cooling from the K/T impact. — Earth Planet. Sci. Lett. **188**: 399-412.

HILDEBRAND A.R., PENFIELD G.T., KRING D.A., PILKINGTON M., CARMARGO Z.A., JACOBSEN S.B. & W.V. BOYNTON (1991): Chicxulub crater: A possible Cretaceous-Tertiary boundary impact crater on the Yucatan Peninsula, Mexico. — Geology **19**: 867-871.

HOLSER W.T. & H.P. SCHÖNLAUB (eds) (1991): The Permian-Triassic boundary in the Carnic Alps of Austria (Gartnerkofel Region). — Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, Wien, Band **45**: 1-232.

HOLSER W.T., SCHÖNLAUB H.P., ATTREP M. Jr., BOECKELMANN K., KLEIN P., MAGARITZ M., ORTH C.J., FENNINGER A., JENNY C., KRALIK M., MAURITSCH H., PAK E., SCHRAMM J.M., STATTEGGER K. & R.

SCHMÖLLER (1989): A unique geochemical record at the Permian-Triassic boundary. — Nature **337**: 39-44.

KAIHO K., KAJIWARA Y., NAKANO T., MIURA Y., KAWAHATA H., TAZIKI K., UESHIMA M., CHEN Z. & G.R. SHI (2001): End-Permian catastrophe by bolide impact: Evidence of a gigantic release of sulfur from the mantle. — Geology **29**: 815-818.

KAMO S.L. & T.E. KROGH (1995): Chicxulub crater source for shokked zircons from the Cretaceous-Tertiary boundary layer, Saskatchewan: Evidence from new U-Pb data. — Geology **23**: 281-284.

KELLER G., ADATTE T., STINNESBECK W., REBOLLEDO-VIEYRA M., FUCUGAUCHI J.U., KRAMAR U. & D. STÜBEN (2004): Chicxulub impact predates the K-T boundary mass extinction. — Proceedings of the National Academy of Science **97** (1): 1-6.

KOEBERL C. (1986): Geochemistry of tektites and impact glasses. — Annual Reviews of Earth and Planetary Science **14**: 323-350.

KOEBERL C. (1996): Chicxulub – The K-T boundary impact crater: A review of the evidence, and an introduction to impact crater studies. — Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt (Wien) **53**: 23-50.

KOEBERL C. (1998a): Impakt: Gefahr aus dem All. — Verlag VaBene, Wien-Klosterneuburg. (ISBN 3-85167-074-4): 1-184.

KOEBERL C. (1998b): Identification of meteoritical components in impactites. — In: GRADY M.M., HUTCHISON R., MCCALL G.J.H. & D.A. ROTHERY (Eds), Meteorites: Flux with Time and Impact Effects. Geological Society of London, Special Publication **140**: 133-152.

KOEBERL C. (2002): Mineralogical and geochemical aspects of impact craters. — Mineralogical Magazine **66**: 745-768.

KOEBERL C. (2004): Remote sensing studies of impact craters: how to be sure? — Comptes Rendus Geoscience **336**: 959-961.

KOEBERL C. (2007): Impakt und Massensterben – Ein Überblick über den aktuellen Forschungsstand. — Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, Wien **147**: 169-191.

KOEBERL C. & K. MACLEOD (eds) (2002): Catastrophic Events and Mass Extinctions: Impacts and Beyond. — Geological Society of America, Special Paper **356**, 746 pp.

KOEBERL C. & F. MARTINEZ-RUIZ (2003): The stratigraphic record of impact events: A short overview. In: KOEBERL C. & F. MARTINEZ-RUIZ (Eds), Impact Markers in the Stratigraphic Record). Impact Studies, vol. **3**, Springer, Heidelberg: 1-40.

KOEBERL C. & B. MILKEREIT (2007): Continental drilling and the study of impact craters and processes – an ICDP perspective. — In: HARMS U., KOEBERL C. & M.D. ZOBACK (Eds), Continental Scientific Drilling. Springer, Heidelberg: 95-161.

KOEBERL C., ARMSTRONG R.A. & W.U. REIMOLD (1997): Morokweng, South Africa: A large impact structure of Jurassic-Cretaceous boundary age. — Geology **25**: 731-734.

KOEBERL C., GILMOUR I., REIMOLD W.U., CLAEYS P. & B.A. IVANOV (2002): Comment on "End-Permian catastrophe by bolide impact: Evidence of a gigantic release of sulfur from the mantle" by KAIHO et al. — Geology **30**: 855-856.

KOEBERL C., FARLEY K.A., PEUCKER-EHRENBRINK B. & M.A. SEPHTON (2004): Geochemistry of the end-Permian extinction event in Austria and Italy: No evidence for an extraterrestrial component. — Geology **32**: 1053-1056.

KRING D.A. (1997): Air blast produced by the Meteor Crater impact event and a reconstruction of the affected environment. — Meteoritics and Planetary Science **32**: 517-530.

LANGENHORST F., KYTE F.T. & G.J. RETALLACK (2005): Reexamination of quartz grains from the Permian-Triassic boundary section at Graphite Peak, Antarctica. — Lunar and Planetary Science **36**, abs. # 2358.

LEWIS J.S. (1997): Rain of iron and ice: The very real threat of comet and asteroid bombardment. — Addison-Wesley Publishing Comp.: 1-240.

LYONS J.R. & T.J. AHRENS (2003): Terrestrial acidification at the K/T boundary. — In: DAVISON L. et al. (Eds), High-pressure shock composition of solid V: Shock chemistry with applications to meteorite impacts: New York, Springer-Verlag: 181-197.

MARUOKA T. & C. KOEBERL (2003): Acid-neutralizing scenario after the K-T impact event. — Geology **31**: 489-492.

MARUOKA T., KOEBERL C., HANCOX P.J. & W.U. REIMOLD (2003): Sulfur geochemistry across a terrestrial Permian-Triassic boundary section in the Karoo Basin, South Africa. — Earth and Planetary Science Letters **206**: 101-117.

MELOSH H.J. (1989): Impact cratering – A geologic process. — Oxford University Press, New York: 1-245.

MONTANARI A. & C. KOEBERL (2000): Impact Stratigraphy: The Italian Record. — Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. **93**, Springer Verlag, Heidelberg: 1-364.

MUKHOPADHYAY S., FARLEY K. & A. MONTANARI (2001): A 35 Myr record of helium in pelagic limestones: implications for interplanetary dust accretion from the early Maastrichtian to the Middle Eocene. — Geochimica et Cosmochimica Acta **65**: 653-669.

MÜLLER R.D., GONCHAROV A. & A. KRITSKI (2005): Geophysical evaluation of the enigmatic Bedout basement high, offshore northwestern Australia. — Earth and Planetary Science Letters **237**: 264-284.

OLSEN P.E., KENT D.V., SUES H.-D., KOEBERL C., HUBER H., MONTANARI A., RAINFORTH E.C., FOWELL S.J., SZAJNA M.J. & B.W. HARTLINE (2002): Ascent of dinosaurs linked to Ir anomaly at Triassic-Jurassic boundary. — Science **296**: 1305-1307.

PIERAZZO E., KRING D.A. & H.J. MELOSH (1998): Hydrocode simulation of the Chicxulub impact event and the production of climatically active gases. — Journal of Geophysical Research **103**: 28607-28625.

PILKINGTON M. & R.A.F. GRIEVE (1992): The geophysical signature of terrestrial impact craters. — Reviews of Geophysics **30**: 161-181.

POAG C.W., KOEBERL C. & W.U. REIMOLD (2004): Chesapeake Bay Crater: Geology and Geophysics of a Late Eocene Submarine Impact Structure. — Impact Studies, vol. **4**, Springer Verlag, Heidelberg (+ CD-ROM): 1-522.

POREDA R.J. & L. BECKER (2003): Fullerenes and interplanetary dust at the Permian–Triassic boundary. — Astrobiology **3**: 75-90.

RAMPINO M.R. & B.M. HAGGERTY (1996): Impact crises and mass extinctions: A working hypothesis. — In: RYDER G., FASTOVSKY D. & S. GARTNER (Eds), New Developments Regarding the KT Event and Other Catastrophes in Earth History. Geological Society of America, Special Paper **307**: 11-30.

RAVIZZA G. & B. PEUCKER-EHRENBRINK (2003): Chemostratigraphic evidence of Deccan Volcanism from the marine osmium isotope record. — Science **302**: 1392-1395.

REIMOLD W.U., KOEBERL C., BRANDSTÄTTER F., KRUGER F.J., ARMSTRONG R.A. & C. BOOTSMAN (1999): The Morokweng impact structure, South Africa: Geologic, petrographic, and isotopic results, and implications for the size of the structure. — In:

Dressler B.O. & V.L. Sharpton (Eds), Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution II, Geological Society of America Special Paper **339**: 61-90.

Renne P.R., Farley K.A., Reimold W.U., Koeberl C., Rampino M.R., Kelley S.P. & B.A. Ivanov (2004): Is Bedout an impact crater? Take 2. — Science **306**: 610-612.

Retallack G.J., Seyedolali A., Krull E.S., Holser W.T., Ambers C.P. & F.T. Kyte (1998): Search for evidence of impact at the Permian-Triassic boundary in Antarctica and Australia. — Geology **26**: 979-982.

Ryder G., Fastovsky D. & S. Gartner (eds) (1996): The Cretaceous-Tertiary Event and other Catastrophes in Earth History. — Geological Society of America Special Paper **307**: Boulder, CO, Geological Society of America: 1-576.

Schulte P., Speijer R., Mai H. & A. Kontny (2006): The Cretaceous-Paleogene (K-P) boundary at Brazos, Texas: Sequence stratigraphy, depositional events and the Chicxulub impact. — Sedimentary Geology **184**: 77-109.

Self S., Widdowson M., Thordarson T. & A.E. Jay (2006): Volatile fluxes during flood basalt eruptions and potential effects on the global environment: A Deccan perspective. — Earth and Planetary Science Letters **248**: 518-532.

Sharpton V.L. & P.D. Ward (Eds) (1990): Global Catastrophes in Earth History. — Geological Society of America Special Paper **247**: Boulder, CO, Geological Society of America: 1-631.

Sigurdsson H., D'Hondt S. & S. Carey (1992): The impact of the Cretaceous/Tertiary bolide on evaporite terrane and generation of major sulfuric acid aerosol. — Earth and Planetary Science Letters **109**: 543-559.

Smit J. (1999): The global stratigraphy of the Cretaceous-Tertiary boundary impact ejecta. — Annual Reviews of Earth and Planetary Science **27**: 75-113.

Spencer J.R. & J. Mitton (1995): The great comet crash. — Cambridge University Press, Cambridge: 1-118.

Stöffler D. & F. Langenhorst (1994): Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: I. Basic observations and theory. — Meteoritics **29**: 155-181.

Stuart J.S. & R.P. Binzel (2004): Bias-corrected population, size distribution, and impact hazard for the near-Earth objects. — Icarus **170**: 295-311.

Tanner L.H. & F.T. Kyte (2005): Anomalous iridium enrichment at the Triassic-Jurassic boundary, Blomidon Formation, Fundy Basin, Canada. — Earth and Planetary Science Letters **240**: 634-641.

Taylor S.R. & S.M. McLennan (1985): The Continental Crust: Its Composition and Evolution. — Blackwell Scientific Publications, Oxford: 1-312.

Toon O.B., Zahnle K., Morrison D., Turco R.P. & C. Covey (1997): Environmental perturbations caused by the impacts of asteroids and comets. — Reviews of Geophysics **35**: 41-78.

Walkden G., Parker J. & S. Kelley (2002): A late Triassic impact ejecta layer in southwestern Britain. — Science **298**: 2185-2188.

Ward S.N. & E. Asphaug (2000): Asteroid impact tsunami: a probabilistic hazard assessment. — Icarus **145**: 64-78.

Wolbach W.S., Gilmour I. & E. Anders (1990): Major wildfires at the Cretaceous/Tertiary boundary. — In: Sharpton V.L. & P.D. Ward (eds), Global Catastrophes in Earth History, Geological Society of America Special Paper **247**: Boulder, CO, Geological Society of America: 391-400.

Yang W. & T.J. Ahrens (1998): Shock vaporization of anhydrite and global effects of the K/T bolide. — Earth and Planetary Science Letters **156**: 125-140.

Anschrift des Verfassers:

Univ.-Prof. Dr. Christian Koeberl
Center for Earth Sciences, Universität Wien
Althanstraße 14
1090 Wien
Austria
E-Mail: christian.koeberl@univie.ac.at